

Teknillinen korkeakoulu
Puunjalostusosasto
Paperiteollisuuden opintosuunta

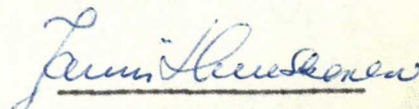
Diplomityö

ERÄIDEN TEKIJÖIDEN VAIKUTUS KARTIOMYLLYJAUHATUKSEN JAUHATUSTULOKSEEN JA
TALOUDELLISUUTEEN OMINAISÄRMÄKUORMITUSTEORIAN PERUSTEELLA TUTKITTUNA

Työ on tehty TKK:n paperiteknillisessä
laboratoriossa prof. N. Rytin johdolla.
Hänelle pyydän saada lausua lämpimät
kiitokseni saamistani asiantuntevista
ohjeista.

Niinikään haluan kiittää työtäni valvo-
nutta tekn.lis. A. Arjasta saamistani
arvokkaista neuvoista sekä paperiteknil-
lisen laboratorion henkilökuntaa työn
käytännön suorittamisessa saamistani
avusta.

Helsinki 19.11.1968


Jouni Huuskonen

JOHDANTO

Jauhatus on eräs keskeisimmistä paperinvalmistuksen osaprosesseista. Siinä luodaan perusta useimmille valmiin paperin ominaisuuksille. Paperin pohjanmuodostuksen parantamiseksi ennen suoritettu katkova jauhatuus on nykyään menettänyt merkityksensä lyhyiden lehtipuukuitujen käytön yleistyttyä ja jauhatuksen primääriseksi tavoitteeksi on muodostunut kuitujen välisen sitoutumisen edellytysten parantaminen. Valmiin paperin lujuus määräytyykin pääasiassa jauhatuksessa, mutta lähes kaikki muutkin arkin ominaisuudet ovat jauhatuksesta riippuvia.

Jauhatuksella aiheutetut ominaisuuksien muutokset riippuvat jauhatuksen määrästä ja tavasta, jolla jauhatuus suoritetaan. Näitä puolestaan säätelevät lukuiset jauhimen rakenteesta, ajo-oloista ja käytetyn massan ominaisuuksista johtuvat jauhatustekijät. Näiden tekijöiden suuresta määrästä ja keskinäisestä riippuvuudesta johtuen on jauhatusprosessin hallinta vaikeaa. Niiden perusteella ei ole pystytty ennustamaan jauhatus tulosta (jauhautumisen määrää ja laatua). Huomattava edistysaskel jauhatuksen hallinnan (jauhatustuloksen ennustettavuuden) kannalta näyttää kuitenkin olevan Brechtin et al. kehittämä ominaissärmäkuormitus-teoria. On havaittu, että ominaissärmäkuormituksella, joka määritellään tietyllä tavalla lasketun puhtaan jauhatus tehon ja jauhimen leikkauspi-tuuden suhteena, on merkitystä jauhatustuloksen määräytymisessä. Sen avulla voitaneen ainakin osittain ennustaa tietyllä massalla saavutettava jauhatus tulos, selittää eräiden jauhatus tekijöiden vaikutus ja löytää pe-rusteet myös jauhatuksen taloudellisuuden arvosteluun.

Tämän tutkimuksen eräänä tarkoituksena oli pyrkiä ominaissärmäkuormitus-teorian perusteella selvittämään jauhimen kuormituksen, pyörimisnopeuden,

jauhatussakeuden ja tilavuusvirtauksen vaikutusta tietyn jauhimen tietyllä massalla aikaansaamaan jauhatustulokseen sekä sen määräytymistä ja ennustettavuutta näiden jauhatustekijöiden perusteella. Näissä puitteissa oli tarkoituksena tutkia myös mainittujen jauhatustekijöiden vaikutusta jauhatuksen talouteen sekä pyrkiä tältä pohjalta löytämään järkevän jauhatussysteemien suunnittelun ja jauhatuksen käytännön suorittamisen suuntaviivat.

Vaikka tutkimus oli vain yhden tietyn terityksen omaavan kartiojauhimen toiminnan kartoittamista käytettävän laitteiston asettamissa rajoissa, voitaneen tutkimusta ainakin osaltaan pitää aivan yleisesti jauhatusprosessia koskevana.

SISÄLLYSLUETTELO

sivu

A. KIRJALLISUUSOSA

1. <u>JAUHATUKSEN TEORIAA</u>	1
1.1. Jauhatuksen tarkoitus	1
1.2. Jauhatusvaikutuksen aikaansaaminen	1
1.3. Jauhatuksen vaikutus kuituihin	3
2. <u>JAUHATUSTULOSTA SÄÄTELEVÄT TEKIJÄT</u>	7
2.1. Yleistä	7
2.2. Jauhatustulokseen vaikuttavia tekijöitä	9
2.2.1. Jauhimen rakenne	10
2.2.2. Ajo-olot	12
2.3. Jauhatusprosessin hallinta	17
2.3.1. Yleistä	17
2.3.2. Ominaisrämmäkuormitus jauhatustapahtumaa karakterisoivana tunnuslukuna	19
2.3.2.1. Ominaisrämmäkuormitusteorian perusteet	19
2.3.2.2. Ominaisrämmäkuormitusteorian kokeellinen tutkiminen ..	24
2.4. Yhteenveto jauhatustulosta säätelevistä tekijöistä	28
3. <u>JAUHATUKSEN TALOUDELLISUUSNÄKÖKOHDAT</u>	30
3.1. Jauhatusprosessin talouden arvostelun perusteet	30
3.2. Jauhatuksen taloudellisuuteen vaikuttavia tekijöitä	33
3.2.1. Jauhimen rakenne	33
3.2.2. Ajo-olot	34
3.3. Yhteenveto taloudellisuuteen vaikuttavista tekijöistä	37

B. KOKEELLINEN OSA

1. <u>TUTKIMUKSEN TARKOITUS</u>	39
2. <u>JAUHATUSLAITTEISTO</u>	39
2.1. Laitteiston yleisesittely	39
2.2. Jauhimen pumppukäyrät	41
2.3. Jauhimen häviötehot	42
3. <u>KOESUUNNITELMA</u>	45
4. <u>KOEAJOJEN SUORITUS</u>	48
4.1. Massan sulputus	48
4.2. Sulpun kuidutus	48
4.3. Sulpun jauhatus	49
4.4. Mittaukset ja määritykset	52
5. <u>TUTKIMUSTULOKSET</u>	54
5.1. Tulosten tarkastelun kriteerit	54
5.2. Toistettavuustutkimukset	55
5.3. Ominaisrämmäkuormituksen vaikutus jauhatustulokseen	56
5.4. Jauhimen pyörimisnopeuden vaikutus jauhatustulokseen tietyllä ominaisrämmäkuormituksella	59
5.5. Jauhatussakeuden vaikutus jauhatustulokseen	62
5.6. Tilavuusvirtauksen vaikutus jauhatustulokseen	65
6. <u>TALOUDELLISUUSTARKASTELUT</u>	66
6.1. Tarkastelun perusteet	66
6.2. Pyörimisnopeuden vaikutus jauhatuksen talouteen tietyllä ominaisrämmäkuormituksella	67
6.3. Jauhatussakeuden vaikutus jauhatuksen talouteen	69
6.4. Tilavuusvirtauksen vaikutus jauhatuksen talouteen	70
6.5. Ominaisrämmäkuormituksen vaikutus jauhatuksen talouteen ..	71

7. <u>YHTEENVETO TUTKIMUKSESTA</u>	73
7.1. Jauhatustuloksen määräytyminen tutkittujen jauhatus- tekijöiden perusteella	73
7.2. Tutkittujen muuttujien vaikutus jauhatuksen talouteen	78
7.3. Jauhatuksen suunnittelun ja käytännön suorittamisen kriteerit tutkimuksen perusteella	80
7.4. Tutkimuksen tavoitteen saavuttamisesta ja mahdollisten jatkotutkimusten suuntaviivat	83
Kirjallisuutta	85
Liitteiden (83 kpl) sisällysluettelo	89

A. KIRJALLISUUSOSA

Syvästytä
LINEN IBANK

1. JAUHATUKSEN TEORIAA

1.1. Jauhatuksen tarkoitus

Valmiin paperin varsinaisina koossapitävinä voimina ovat kuitujen väliset sidokset. Kuitujen välisen sitoutumisen lujuuteen vaikuttavat kuidun fysikaalisen ja kemiallisen tilan määräämä sitoutumisvoima ja kuitujen taipuisuuden ja kuituja yhteenpuristavien voimien säätelemä sitoutuspinta (1). Sellukuidut eivät sellaisenaan sovellu juuri minkäänlaisen paperin valmistukseen sitoutumiselle epäedullisen fysikaalisen ja kemiallisen rakenteensa vuoksi. Isotrooppinen primäärikalvo ja ristikkäisistä, kuitua spiraalimaisesti kiertävistä mikrofibrilleistä muodostunut sekundääriseinämän uloin kerros ympäröivät kuitua jäykkänä tuppina. Nämä kuidun osat sisältävät lisäksi vain vähän kuidun hemiselluloosasta, joka amorfisuutensa ja haaroituneiden ketjumolekyyliensä vuoksi on erittäin hydrofiilinen ja lujan kuitujen välisen sitoutumisen perusta.

Jauhatuksen paperiteknillisenä tavoitteena on kuituja mekaanisesti rasittamalla parantaa kuitujen välisen sitoutumisen edellytyksiä, siis muokata kuidun pintaa sopivasti ja lisätä kuitujen välisen kontaktin mahdollisuutta.

1.2. Jauhatusvaikutuksen aikaansaaminen

Kuitujen muokkaus suoritetaan erityyppisillä jauhimilla. Periaatteena miltei kaikissa jauhimissa on vedessä olevien kuitujen dynaaminen rasittaminen toistensa suhteen liikkuvien teräsärmien ja -pintojen avulla. Tarkka jauhatustapahtuman mekanismi on vielä tuntematon. Selvää on kui-

tenkin, että jauhimessa kuidut joutuvat monien erityyppisten voimien vaikutuksen alaisiksi (2),(3),(4). Terien välissä teräpaineen ja terien keskinäisen liikkeen aiheuttamat voimat puristavat, taivuttavat ja leikkaavat kuituja. Roottorin pyörimisliikkeen ja jauhatusvyöhykkeellä olevien virtausesteiden vuoksi virtaavassa sulpussa esiintyy äkillisiä painevaihteluita ja virtausnopeuden muutoksia, jotka aiheuttavat jännityksiä kuituihin. Kuituflokkien merkitystä esiintyvien voimien siirtäjänä on korostettu (5). Terän kosketuksesta tai paikallisesta vesipyörteestä syntyvät voimat siirtävät tämän teorian mukaan liike-energiansa kuituflokkiin, jonka kuidut joutuvat erilaisten jännitysten alaisiksi. Kuitujen välinen kitkakin saattaa tällöin tulla merkittäväksi. Kuituja muokkaavat voimat voivat siis siirtyä kuituihin terän välityksellä, veden kautta tai kuituflokkien kautta. Tämän perusteella on ilmeistä, että kuituihin vaikuttavien voimien suuruus vaihtelee aivan pienistä kitkavoimista terävälissä vaikuttaviin suuriin, jopa kuituja murskaaviin voimiin. Perustellusti voidaan puhua kuituihin vaikuttavasta voimasppektristä (2).

Oleellista jauhatukselle on vielä, että se suoritetaan kuituja turvottavassa nesteessä. Jos massan jauhatus suoritetaan veden sijasta nesteessä, joka ei pysty turvottamaan kuituja, tapahtuu ainoastaan kuitujen murskautumista ja katkeilemista ja jauhatuksen päätavoite, kuitujen sitoutumispotentiaalin lisääminen jää saavuttamatta.

Kuituja rasittavat voimat ja kuidun sisäinen turpoamispaine saavat aikaan jauhatusvaikutuksen, joka näkyy kuidun fysikaalisen ja kemiallisen rakenteen muutoksina.

1.3. Jauhatuksen vaikutus kuituihin

Jauhamattoman ja jauhetun kuidun fysikaalinen ja kemiallinen rakenne eroavat huomattavasti toisistaan. Kuidun muokkautumisen voidaan katsoa olevan seuraus veden ja erisuuruisten voimien aiheuttamista perusvaikutuksista. Hypoteettisesti voidaan erotella erilaisia perusvaikutuksia, jotka kuidun rakenteesta johtuen liittyvät melko läheisesti toisiinsa. On huomattava, että perusvaikutusten suuruus vaihtelee jauhatuksessa kuidusta toiseen. Jauhatuksen tulos ei siis ole homogeeninen.

Varsinaisina perusvaikutuksina voidaan pitää seuraavia (4),(6):

- kuidun sisäkerrosten välisten vetysidosten rikkoutuminen ja korvautuminen vesimolekyylien ja ketjumolekyylien välisillä vetysidoksilla sekä hemiselluloosan ja ligniinin osittainen liukeneminen (sisäinen fibrillaatio)
- kuidun pinnan rikkoutuminen, fibrilloituminen ja ulkoisten kerrosten lohkeaminen sekä tästä johtuva hienoaineen muodostuminen
- kuitujen katkeileminen

Veden absorpoituminen kuituun synnyttää ulospäin suuntautuvan turpoamis-paineen, jota vastustaa joustamattomista kuidun primäärikalvosta ja sekundääriseinämän uloimmasta kerroksesta sekä ehjistä ketjumolekyylien välisistä vetysidoksista muodostuva estämismekanismi. Turpoamis-paineen ja estämismekanismien aiheuttamien jännitysten välillä vallitsee tasapaino, jota jauhatus siirtää suuremman turpoamisen suuntaan katkomalla estäviä elementtejä. Turpoaminen edistyy ja hydrofiilistä hemiselluloosaa kulkeutuu kuidun pinnalle liueten osittain veteen ja muodostaen kuidun pinnalle kolloidisen polysakkaridiliuoksen.

Kuidun pintaosien mikrofibrillikimppuja irtoaa osittain ja kuidut hai-ventuvat. Osa mikrofibrillikimpuista ja kuidun primäärikalvosta irtoaa kokonaan ja sulppuun muodostuu hienoainetta. Osa kuiduista katkeilee, kun kuidun veto- tai leikkauslujuus ylitetään eikä kuitu voi väistää tämän suuren voiman vaikutusta.

Kuituihin kohdistuvien voimien suuruus ja kuidun ja sen rakenneosien lujuus säätelevät kuidulle jauhatuksessa tapahtuvia muutoksia (2). Kuidun rakenneosien lujuutta pienemmät jännitykset aiheuttavat vain kimmoisia, palautuvia muutoksia. Suuremmat jännitykset aiheuttavat etupäässä hemiselluloosan ketjumolekyylien välisten vetysidosten katkeilemisiä ja kuitu pyrkii turpoamaan. Tätä suuremmat jännitykset rikkovat kuidun pintaa ja aiheuttavat kuidun pinnan fibrilloitumisen. Suurimmat jännitykset riittävät katkaisemaan tai murskaamaan kuidun. Mainittakoon, että voiman kestoajalla saattaa myös olla vaikutusta siihen aiheutuuko kuituum pysyviä muutoksia (3). Jos jännityksen kesto aika on lyhyt, ei plastista muodonmuutosta ehdi tapahtua ja seurauksena on vain kimmainen muodonmuutos.

Jauhatuksen perusvaikutukset muuttavat kuidun ominaisuuksia melkoisesti. Yksittäisten kuitujen vetolujuuteen ei jauhatuksella ole suurtakaan vaikutusta. Sen sijaan yksittäisen kuidun vetojännitys kasvaa johtuen kuidun poikkipinnan pienenemisestä jauhatuksessa (7).

Kuitujen ulkoinen pinta kasvaa huomattavasti jauhatuksessa fibrillaation ja hienoaineen muodostumisen seurauksena.

Kuitujen taipuisuuden lisääntyminen on tärkeä jauhatuksen vaikutus. Taipuisuuden lisääntyminen johtuu kuituseinämän sisäisten vetysidosten katkeilemisesta ja sitä seuraavasta kuidun turpoamisesta. Myös kuitujen kokoonpuristumiskyky paperin valmistuksessa ja kuitujen mukautumiskyky

kuitujen kosketuskohdassa lisääntyy. Syynä tähänkin voidaan pitää kuidun sisäisen rakenteen höltymistä ja turvonneen kuidun parempaa vedenpidätyskykyä.

Kuidun pinnalle muodostunut kolloidinen polysakkaridiliuos tekee kuidun pinnan sitoutumiselle erittäin edulliseksi. Hemiselluloosa on amorfisuutensa ja haaroittuneiden ketjumolekyyliensä vuoksi erittäin hyvä perusta kuitujen välisten vetysidosten syntymiselle paperinvalmistusvaiheessa.

Jauhatuksen vaikutukset näkyvät myös sulpun ominaisuuksien muutoksina. Tässä on jälleen syytä korostaa, että jauhatus ei käsittele kuituja yhtenäisesti vaan eri kuitujen jauhatustila vaihtelee huomattavasti (20). Sulpun samoin kuin valmiin paperin ominaisuudet riippuvat näin yksityisten kuitujen jauhatustilajakautumasta, jota voidaan kuvata jakautuman keskiarvon ja jonkin hajontaluvun avulla. Lisäksi vaikuttavat kuiduista irronneet osat, jotka muodostavat sulppuun hienoaainetta.

Sulpun keskimääräinen suotautumisvastus kasvaa huomattavasti jauhatuksessa (6). Syynä suotautumisvastuksen kasvuun on pääasiassa hienoaineen muodostuminen ja sitä seuraava kuitujen ominaispinnan huomattava kasvu. Merkitystä on myös ominaistilavuuden ja kuitumaton kokoonpuristuvuuden muutoksilla.

Ilman tarkempaa selvittelyä voidaan mainita, että jauhatuksella on vaikutusta myös massasulpun virtausominaisuuksiin (6).

Yksityisten kuitujen ja niistä koostuvan sulpun ominaisuudet ja arkin-teko-olosuhteet määräävät valmiin paperin ominaisuudet. Paperin käytännön kannalta tärkeät, esimerkiksi laaduntarkkailussa mitattavat lujuus- ja optiset ym. ominaisuudet ovat seuraus tietyistä valmiin paperin

perusominaisuuksista. Näillä perusominaisuuksilla tarkoitetaan kuidun ja kuitusidosten ominaisuuksia. Edellä on esitetty, miten kuidun kemiallinen ja fysikaalinen rakenne jauhatuksessa muuttuu. Kuidun pinta tulee sitoutumisen kannalta edullisemmaksi ja kuitujen taipuisuus ja mukautumiskyky kasvaa. Jauhatus edistää kuitujen välisten kosketuskohtien muodostumista suotautumisessa, märkäpuristuksessa ja kuivatuksessa. Kuitujen välisiä sidoksia muodostuu enemmän ja yksityisten sidosten pinta-ala kasvaa. Huomioimatta ei tässä voida jättää hienoaineen muodostumisen merkitystä kuitustruktuurin tiivistäjänä.

Kuitujen sitoutumispotentiaalin kasvu näkyy arkin veto- ja puhkaisulujuuksien kasvuna. Sitoutuvuuden kasvu jauhatuksessa lisää yhdessä hienoainemäärän kasvun kanssa optisten kontaktien lukumäärää arkissa ja alentaa siten paperin opasiteettia ja hajaheijastuskerrointa huolimatta ominaispinnan huomattavasta kasvusta.

Kuitusidosten lisääntymisen ja kuitujen kokoonpuristumisen sekä hienoainemäärän kasvun vaikutuksesta arkki tulee tiiviimmäksi ja sen tilavuuspaino kasvaa ja huokoisuus pienenee (4),(6).

Paperin repäisylujuus kasvaa yleensä aivan jauhatuksen alussa kääntyen jauhatuksen edistyessä laskuun. Repäisykokeessa kuidut joko katkeavat tai repeytyvät irti toisen paperin puoliskon kuitusidoksista. Kuitujen irtivetämiseen ilman katkaisua kuluu enemmän energiaa kuin kuidun katkaisuun. Kun repäisykokeessa mitataan juuri repäisyyn tarvittavaa työtä, voi eräs selitys repäisylujuuden kehittymiseen jauhatuksessa löytyä juuri tästä. Jauhatuksen alkuvaiheessa kuitusidosten osuus kasvaa voimakkaasti ja paperi tiivistyy. Repäisylujuus kasvaa, sillä kuidut irtavat repäisyssä vielä ehjinä ja kuitujen poisvetämistä vastustavat kitkavoimat kasvavat. Jauhatuksen edistyessä kuitusidosten määrä ja lujuus kasvavat ja repäisyvoima kohdistuu pienelle alueelle ja kuidut katkeile-

vat. Seurauksena on repäisylujuuden pieneneminen. Kuitujen katkeileminen jauhatuksessa vaikuttaa pienentävästi repäisylujuuteen, koska lyhytkuituinen rakenne jakaa siihen kohdistuvan voiman pienemmälle alueelle kuin pitkäkuituinen rakenne (4).

2. JAUHATUSTULOSTA SÄÄTELEVÄT TEKIJÄT

2.1. Yleistä

Jauhatus tuloksella tarkoitetaan tässä sitä arkin ja sulpun ominaisuusyhdistelmää, johon jauhatuksella on päästy. Jauhatusprosessin hallinnan ja ymmärtämisen vuoksi on edullista, jos ajatellaan jauhatustuloksen määräytyvän yhden tai useamman perusvaikutuksen suuruudesta riippuvasta jauhautumisen määrästä ja perusvaikutusten keskinäisestä kehitymisnopeudesta riippuvasta jauhautumisen laadusta.

Jauhautumisen määrän mittana voidaan käyttää esimerkiksi SR-luvun tai katkeamispituuden kasvua jauhatuksessa. Jauhautumisen määrää säätelee sulppuun tuodun energian määrä. Voidaan puhua jauhatuksen määrästä, jonka mittana käytetään yleensä sulppuun tuodun ominaisenergian (kWh/t) arvoa (4). On huomattava, ettei ominaisenergiana ilmoitettu jauhatuksen määrä kuvaa jauhatusta eteenpäin vievää energiaa. Teoreettisesti laskettu jauhatusenergian tarve on nimittäin varsin pieni (8). Vain murto-osa jauhimeen tuodusta energiasta muuttaa kuitujen jauhatustilaa suurimman osan kuluessa jauhatuksen kannalta hyödyttömiin turbulensseihin, palautuvien muodonmuutosten aiheuttamiseen ja sulpun pumppaukseen. Esitettäessä sulpun ja arkin ominaisuudet ominaisenergian funktiona saadaan kuva jauhatuksen ja jauhautumisen määrän välisestä riippuvuudesta. Tällä riippuvuudella on varsin suuri merkitys jauhatuksen taloudellisuus-

teen. Tietyn jauhautumisen määrän saavuttamiseen tarvittava ominaisenergia on varsin suuresti riippuvainen massan ominaisuuksista sekä varsinaisista jauhatustekijöistä. Tietyllä sulppuun tuodulla ominaisenergialla saavutetaan siis eri olosuhteissa yleensä erilainen jauhautumisen määrä. Lukuisista jauhatustekijöistä johtuen on jauhautumisen määrä erittäin vaikeasti hallittavissa mainitun jauhatuksen määrän mitan avulla. Tästä syystä olisi löydettävä sellainen jauhatuksen määrän mitta, joka ainakin tietyllä massalla paremmin ennustaisi jauhautumisen määrän. Kokonaisominaisenergiaa käytännöllisempi jauhatuksen määrän mitta on ns. puhdas ominaisenergia, joka lasketaan kokonaisakselitehon ja veden kierrätykseen kuluvaan tehon erotuksen avulla (ks. kohta 2.3.2.1.). Näin menetellen saadaan eliminoiduksi hyödyttömästi turbulensseihin ja pumppaukseen kuluva energia.

Jauhautumisen laatu riippuu siis eri perusvaikutusten keskinäisestä kehittyminenopeudesta ja määrää saavutettavat sulpun ja arkin ominaisuuskombinaatiot. Näin ollen esimerkiksi tietyllä tietyn katkeamispituuden saavuttamisena mitatulla jauhautumisen määrällä jauhautumisen laatu määrää kaikkien muiden ominaisuuksien arvot. Jauhatuksen suoritustavan (= jauhatuksen laatu) ja jauhautumisen laadun välillä on selvä korrelaatio. Vanhan jauhatusteorian mukaan käytetään jauhatuksen laadusta puhuttaessa käsitteitä katkova jauhatus, jossa kuitujen katkeileminen on jauhatuksen päävaikutus ja limoittava jauhatus, jossa sitoutumista edistävät perusvaikutukset kehittyvät ilman sanottavaa kuitujen katkeilua (4). Näiden kahden jauhatuksen laatuparametrin käyttö on kuitenkin hieman harhaanjohtavaa. Puhtaasti katkovaa jauhatusta ei nimittäin ainakaan nykyisin käytetyillä jauhimilla voitane suorittaa (2). Jauhatuksen rajuuden lisääminen tosin lisää katkovaa vaikutusta, mutta tehostaa myös limoittavaa vaikutusta. Limoittavan vaikutuksen lisääminen puolestaan

lisää myös kuitujen katkeilemisen mahdollisuuksia. Näin ollen voidaan puhua vain jauhatuksen rajuuden eri asteista ja katkovammasta ja limoitavammasta jauhautumisesta vertailtaessa eri oloissa suoritettuja jauhatuksia.

Jauhatuksen laadun muutoksien aiheuttamat jauhautumisen laatuerot voidaan havaita vertaamalla arkin tai sulpun ominaisuuksien kehittymistä toistensa funktiona. Varovampi jauhatus johtaa suurempaan kuitujen sitoutumispotentiaaliin ja vähäisempään kuitujen katkeilemiseen kuin rajumpi jauhatus. Jauhatuksen suoritustapa näkyy erityisen hyvin vertailtaessa sitoutumisesta ja kuitupituudesta suuresti riippuvia ominaisuuksia toisiinsa. Erittäin herkkä jauhatuksen laadun indikaattori on paperin repäisylujuus tietyllä vetolujuuden arvolla. Repäisylujuushan riippuu suuresti kuitupituudesta ja vetolujuus on melko puhdas kuitujen välisen sitoutumisen mitta. Jauhatuksen ollessa varovampi saavutetaan tietyllä vetolujuudella suuremmat repäisylujuudet kuin rajummassa jauhatuksessa.

2.2. Jauhatustulokseen vaikuttavia tekijöitä

Jauhatustulokseen voidaan vaikuttaa muuttelemalla lukuisia jauhatukseen vaikuttavia tekijöitä.

Jauhatukseen vaikuttavat tekijät voidaan ryhmitellä esimerkiksi seuraavasti:

- massasta johtuvat tekijät
- jauhimen rakenteesta johtuvat tekijät
- ajo-oloista johtuvat tekijät

Tapauksesta riippuen voidaan jokin jauhatustekijä lukea eri ryhmiin ja rajanveto joidenkin tekijöiden osalta on esitetyn ryhmittelyn puitteissa melko vaikeaa. Esimerkiksi jauhimen pyörimisnopeus on tavallisesti rakenteellinen jauhatusmuuttuja, mutta jos sitä voidaan säätää kuten tässä tutkimuksessa, se on selvästi ajo-oloihin kuuluva muuttuja.

Massan ominaisuuksien vaikutusta jauhatustulokseen ei tämän työn puitteissa käsitellä tarkemmin. Voidaan vain mainita, että kuitujen kestävyys jauhimessa esiintyviä iskuja vastaan vaihtelee. Massalaji, keittotapa, sellun hemi- ja ligniinipitoisuus, sellun kuivatus jne. vaikuttavat kuitujen turpoamisominaisuuksiin ja säätelevät siten myös jauhatustulosta (4). Kuidun morfologisilla ominaisuuksilla, massan pH:lla ja mahdollisesti massassa olevilla lisäaineilla on myös vaikutusta jauhatuksen kulkuun.

Seuraavat tarkastelut on suoritettu kartiomyllyjauhatusta silmälläpitäen, vaikka useimmat tulokset soveltunevat myös muilla jauhintyypeillä suoritettuihin jauhatuksiin.

2.2.1. Jauhimen rakenne

Jauhimen konstruktion vaikutus jauhatustulokseen on vielä suurelta osalta epäselvä. Tutkimusten tulokset ovat varsin sekavia ja useasti keskenään ristiriitaisia. Varmaa kuitenkin on, että mm. terien mitoilla, lukumäärällä, sijoituksella jauhinerungolle, terämateriaalilla ja terien kunnolla on suuri vaikutus jauhatuksen kulkuun. Jauhimen rakenteesta johtuvilla pumppuvaikutuksella ja paluuvirtauksilla lienee myös vaikutuksensa jauhatuksessa (9).

Jauhinkonstruktion vaikutuksen tutkimusta vaikeuttaa se, että yksityisten tekijöiden muutokset yleensä muuttavat myös muita jauhatusolosuhteita. Esimerkkinä voidaan mainita teräleveyden vaikutuksen tutkiminen. Halutun massavirran läpäisykyvyn turvaaminen asettaa alarajan jauhatusvyöhykkeen vapaalle poikkipinnalle. Vapaan poikkipinnan vakioiminen terien leveyttä kasvatettaessa johtaa joko terien lukumäärän vähentämiseen tai terien korkeuden kasvattamiseen. Näin ollen ei teräleveyden vaikutusta saada sellaisenaan esille. Terien lukumäärän ja korkeuden vakioiminen puolestaan muuttaa vapaata poikkipintaa ja siten luultavasti myös virtausolosuhteita jauhatusvyöhykkeellä. Tässäkään tapauksessa teräleveyden vaikutusta ei saada puhtaana esille.

Jauhimen terien vaikutus jaetaan yleisesti teräsärmien ja teräpintojen vaikutukseen.

Teräsärmien pituuden tai lukumäärän kasvattaminen näyttää johtavan varovampaan jauhatukseen (10). Syynä tähän voidaan pitää kuituihin tai kuituflokkeihin teräsärmien kautta kohdistuvien iskujen jakautumista suuremmalle alalle. Tällöin myös tietyn SR-luvun saavuttamiseen tarvittava ominaisenergia yleensä pienenee (11).

Teräleveyden kasvattaminen näyttää niinikään johtavan varovampaan jauhatukseen (10). Teräpintojen kautta kuituihin kohdistuneet iskut kohdistuvat tällöin suuremmalle alalle ja jauhatuspaine terien välissä pienenee. Mainittakoon, että teräleveyden kasvattaminen pitämällä jauhatusvyöhykkeen vapaa poikkipinta vakiona saattaa johtaa jopa katkovampaan jauhatukseen johtuen teräsärmien lukumäärän vähenemisestä (11).

Teräleveydellä näyttää olevan optimi tietyn SR-luvun saavuttamiseen tarvittavan ominaisenergian suhteen.

Teräsärmien ja -pintojen vaikutukseen jauhatuksen kvantiteettiin ja kvaliteettiin palataan tarkemmin myöhemmin tässä esityksessä.

Jauhimen rakenteen vaikutuksesta jauhatuksen kulkuun voidaan vielä mainita seuraavaa:

- jauhimen eri teräpintojen terien välisen ns. leikkauskulman kasvattaminen siirtää jauhatusta varovampaan suuntaan (11)
- jauhimen terämateriaalilla on suuri vaikutus jauhatuksen kulkuun (11), (12). Esim. pronssiterillä saadaan aikaan katkovampi jauhatus kuin terästerillä. Terämateriaalin kovuudella ei tätä vaikutusta voida selittää. Metallien kiderakenteen ja kulumistavan eroilla ja erilaisella affiniteetilla veteen ja kuituihin uskotaan olevan merkitystä jauhatuksen erilaiseen kulkuun eri terämateriaaleilla.
- terien kunnan merkitystä jauhatuksessa on syytä korostaa (13). Terien epätasainen kuluminen aiheuttaa vaihtelua teräpaineessa. Teräsärmien pyöristyminen pienentää teräsärmillä kuituja rasittavaa jännitystä ja pienentää kuitujen katkeilun mahdollisuutta. Myös terien pintaan kulumisen seurauksena muodostuvilla mikroterillä lienee vaikutusta jauhatuksessa.

2.2.2. Ajo-olot

Jauhimen ajo-olot ovat käytännössä tärkeimmät tekijät, joilla jauhatustulokseen vaikutetaan. Seuraava ajo-olojen vaikutusten tarkastelu on suoritettu tarkemmin vain tämän työn kannalta tärkeiden seikkojen osalta.

Jauhimessa kuituihin kohdistuvien iskujen voimakkuutta voidaan muuttaa jauhimen teräväliä muuttamalla. Terävälin pienentäminen kasvattaa jau-

hatuspainetta ja siirtää jauhimessa vaikuttavan voimaspektrin paino-
pistettä voimakkaampien iskujen suuntaan. Tämä jauhimen kuormituksen
kasvu näkyy tehonoton kasvuna. Oheinen kuva 1. esittää kartiojauhimen

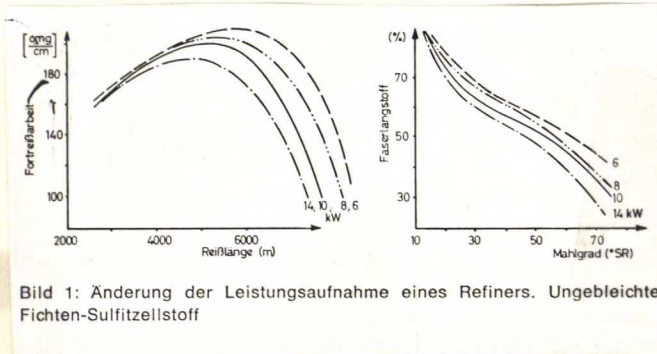


Bild 1: Änderung der Leistungsaufnahme eines Refiners. Ungebleichter Fichten-Sulfitzellstoff

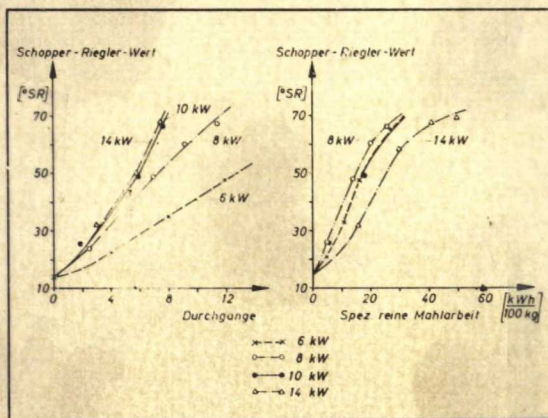


Abb. 14. Kleinrefiner. Einfluss der Antriebsleistung

Kuva 1.

Tehonoton vaikutus jauhatustulokseen

kuormituksella olevan optimi. Tämän optimin paikka riippunee suuresti muista ajo-oloista. Useissa tutkimuksissa sitä ei ole lainkaan havaittu. Yleensä näyttää kuormituksen kasvu pienentävän tietyn jauhautumisen vaatimaa ominaisenergiaa (16).

Jauhimen pyörimisnopeuden muuttamisen vaikutus jauhatuksen kulkuun voidaan ainakin osittain selittää teräsärmien yhteisen pituuden ja terien pinta-alan näennäisen muuttumisen avulla. Pyörimisnopeuden kasvu kasvattaa

teräväliä muuttamalla aiheutetun tehonoton muuttumisen vaikutusta jauhatustulokseen (14),(15). (Kysessä on saman tutkimuksen kaksi eri esitystä.)
Tehonoton kasvaessa saavutetaan tietyllä katkeamispituudella pienempi repäisylujuus ja tietyllä SR-luvun arvolla pienempi pitkäkuituosuus. Tämä osoittaa kuormituksen kasvun muuttavan jauhautumistapaa rajumpaan suuntaan. Tietyn SR-luvun saavuttamiseen tarvittavan puhtaan ominaisenergian suhteen näyttää jauhimen

aikayksikössä toisiaan vastaan työskentelevien teräsärmien pituutta ja terien pinta-alaa, mikä pienentää kuituihin kohdistuvaa rasitusta ja jauhautuminen tapahtuu limoittavammin. Pyörimisnopeuden kasvu lisää aivan ilmeisesti sulpun virtauksen turbulenttisuutta (10), mikä vaikuttanee jauhatussyöhykkeellä vaikuttavaan voimaspektriin voimistamalla pienimpiä kuituihin vaikuttavia voimia. Tästäkin syystä voidaan limoittavan vaikutuksen ajatella kasvavan pyörimisnopeuden kasvaessa.

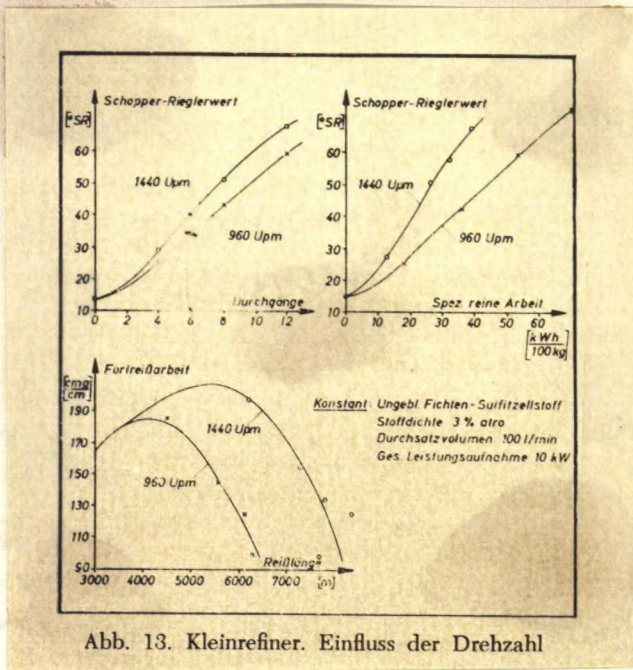


Abb. 13. Kleinrefiner. Einfluss der Drehzahl

Kuva 2.

Pyörimisnopeuden vaikutus jauhatustulokseen

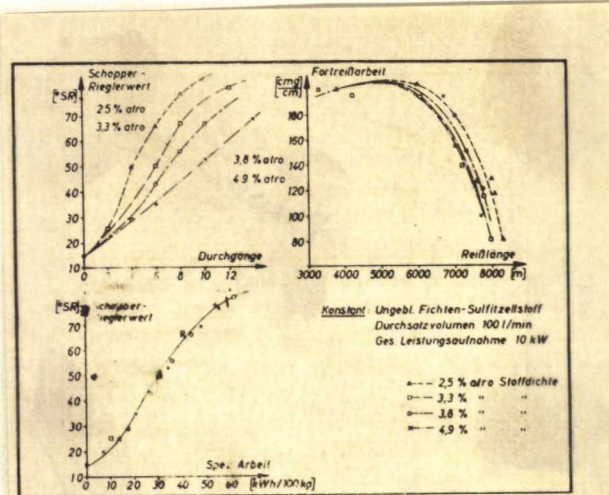
Tietyn jauhautumisen määrän (mitattu SR-luvun nousuna) saavuttamiseen tarvittavan jauhatuksen määrän muutos pyörimisnopeuden muuttuessa on riippuvainen muista ajo-oloista ja optimin esiintyminen on todennäköistä (10).

Jauhatussakeuden kasvattaminen johtaa useiden tutkijoiden mukaan varovampaan jauhatukseen (16), (17), (18). Tietyn jauhautumisen vaatima ominaisenergia näyttää myös näiden tutkijoiden mukaan yleensä kasvavan sakeuden kasvaessa. Eräiden tutkijoiden mukaan (14), (15), (19) ei jauhatussakeu-

Kuvassa 2. on esitetty erään tutkimuksen tulokset pyörimisnopeuden vaikutuksesta jauhatustulokseen (14). Jauhautumisen muuttuu selvästi limoittavammaksi pyörimisnopeuden kasvaessa. Kuvan 2. perusteella näyttää pyörimisnopeuden kasvu pienentävän tietyn SR-luvun saavuttamiseen tarvittavaa puhtaan ominaisenergian määrää.

Eräissä muissa tutkimuksissa on kuitenkin havaittu päinvastainenkin vaikutus. Ilmeisesti

della ole vaikutusta jauhatuksen kulkuun. Kuvassa 3. esitetyt tulokset



Kuva 3.

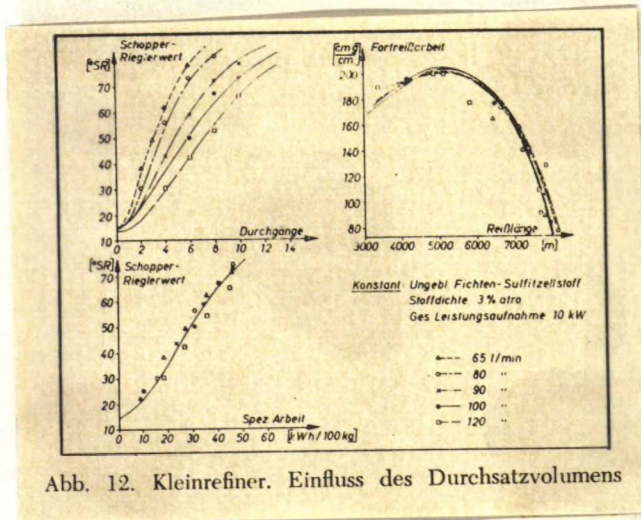
Jauhatussakeuden vaikutus jauhatustulokseen

osoittavat (14), että eri sakeuk-
sissa suoritettut jauhatukset ovat
niin kvantitatiivisesti kuin kva-
litatiivisestikin käytännöllises-
ti katsoen identtiset. Ilmeisesti
syy näin ristiriitaisilta vaikut-
taviin tuloksiin on löydettävissä
erilaisista koeolosuhteista.

Sakeuden kasvun mahdollisesti
jauhatusta varovammaksi tekevä
vaikutus voitaisiin selittää si-
ten, että kuidut tällöin enemmän

suojelevat toisiaan jauhatusvyöhykkeellä esiintyviä iskuja vastaan ja pie-
net kuitujen väliset kitkavoimat tulevat merkityksellisemmiksi. Tästä
syystä muuten vakio-olosuhteissa suoritetuissa jauhatuksissa jauhatus-
vyöhykkeellä vaikuttava voimaspektri muuttaa sakeuden kasvaessa muotoaan
siteten, että pieni-intensiteettiset voimat kasvavat. Tuloksena olisi jau-
hatuksen muuttuminen varovammaksi. Näin ajatellen tuntuu ilmeiseltä,
että jauhatussakeuden vaikutus on riippuvainen ainakin jauhimen kuormi-
tustasosta. Onkin havaittavissa, että kuormitustason kasvattaminen ja
siis jauhatustavan muuttaminen rajummaksi pienentää jauhatussakeuden
vaikutusta jauhatustulokseen (16). Mainittakoon vielä, etteivät erot
eri sakeuksissa suoritettujen jauhatusten jauhatustuloksissa muodostu
kovinkaan suuriksi niidenkään tutkimusten mukaan, joissa jauhatussakeu-
della on havaittu olevan vaikutusta, kun pysytään pumpattavan massan
alueella alle 6 % sakeuksissa.

Tilavuusvirtauksen suuruuden vaikutuksesta jauhatustulokseen on kirjallisuudessa melko epäselviä tuloksia. Yleisvaikutelmaksi jää, ettei tilavuusvirtauksen suuruudella ole merkittävää vaikutusta jauhatuksen kulkuun. Massavirran muuttuminen vaikuttaa vain läpimenoa kohti massaan tuodun energian määrään, mutta tiettyä ominaisenergian arvoa näyttää tietyllä massalla ja tie-



Kuva 4.

Tilavuusvirtauksen vaikutus
jauhatustulokseen

tässä jauhimessa vastaavan samat paperiteknilliset ominaisuudet. Kuvasta 4. (14) nähdään, että jauhatuksen kvantitatiivinen kulku on miltei riippumaton tilavuusvirtauksen suuruudesta. Luonnollisena seurauksena jauhatusten samanlaisesta kvantitatiivisesta kehitymisestä on myös jauhautumisen laadun pysyminen muuttumattomana.

Eräässä tutkimuksessa (16) on tosin havaittu, että suurempi tilavuusvirtaus parantaa hieman vetolujuutta ja huonontaa repäisylujuutta tietyllä jauhimeen tuodun ominaisenergian arvolla, mutta havaitut erot ovat melkoisen pienet. Kvalitatiivisesti eivät nämäkään jauhatukset näytä eroavan toisistaan.

2.3. Jauhatusprosessin hallinta

2.3.1. Yleistä

Jauhatusprosessin hallinta on monien jauhustekijöiden vuoksi vaikeaa. Lukuisten jauhustutkimusten perusteella voidaan vain karkeasti sanoa, mihin suuntaan jauhautumistapa ja tietyn jauhautuneisuuden vaatima jauhuksen määrä muuttuu jonkin jauhustekijän tietynsuuntaisella muutoksella tietyllä massalla, tietyllä jauhimella ja tietyissä olosuhteissa. Jonkin jauhustekijän vaikutus jauhatusprosessissa näyttää olevan riippuvainen myös muiden jauhatusmuuttujien suuruudesta. Edellä esitetyn perusteella voidaan jauhatus tulokseen vaikuttavista tekijöistä esittää seuraava kaavio:

Jos		jauhautumistapa	tietyn jauhautumisen vaatima jauhuksen määrä
- terien lukumäärä kasvaa		limoittavampi	pienenee hieman
- terien pituus kasvaa		limoittavampi	yleensä pienenee hieman
- terien leveys kasvaa		limoittavampi	esiintyy optimi
- kuormitus kasvaa		katkovampi	optimi
- pyörimisnopeus kasvaa		limoittavampi	todennäköisesti optimi
- jauhatussakeus kasvaa		ei muutu (tai hieman limoittavampi)	kasvaa tai ei muutu
- tilavuusvirtaus kasvaa		ei muuttune	ei muuttune

Tekijöiden vaikutus jauhautumistapaan näyttää melko yksikäsitteiseltä mutta vaikutus jauhuksen kvantiteettiin on huomattavasti epämääräisempi.

Tietyn jauhautumisen vaatima jauhatuksen määrä näyttää muuttuvan yksityisiä jauhatustekijöitä muutettaessa jonkin verran eri tavalla eri olosuhteissa. Edellä mainitut optimit eivät ole esiintyneet läheskään kaikissa jauhatustutkimuksissa, mutta tulosten ristiriitaisuus ja eräät tutkimukset puhuvat niiden esiintymisen puolesta.

Tarkasteltaessa jauhatustekijöiden vaikutusta jauhatuksen kvalitatiiviseen kulkuun voidaan niiden kasvattamisen havaita aiheuttavan vastakkaisia muutoksia jauhautumisen laadussa. Esimerkiksi kuormituksen kasvattaminen muuttaa jauhautumistapaa katkovammaksi ja pyörimisnopeuden kasvattaminen limoittavammaksi. Tuntuu luonnolliselta, että jauhautumisen laatu voidaan saada pysymään samana kasvattamalla molempia sopivasti. Jauhatustekijöiden perusteella on näin varmasti löydettävissä jauhatusvyöhykkeellä kuituja rasittavaa voimaspektriä karakterisoiva tunnusluku, joka tietyllä massalla esitettyjä yksityisiä tekijöitä spesifisemmin kuvaaisi jauhatuksen kulkua, ainakin sen kvalitatiivista puolta. Jauhatustapahtumaa kuvaamaan tarkoitettuja tunnuslukuja onkin jo kauan johdettu jauhimen terien mitoista ja ajo-oloista. Smithin (21) mukaan jauhatuksen kuitupituutta lyhentävä vaikutus johtuu teräsärmien välisestä leikkaus-efektistä ja limoittava vaikutus paine- ja murskausvaikutuksesta teräspintojen välissä. Leikkausvaikutus riippuu hänen käsityksensä mukaan aikayksikössä toisiaan vastaan toimivien teräsärmien pituudesta ja limoittava vaikutus aikayksikössä toisiaan vastaan toimivien jauhatuspintojen suuruudesta. Useita muitakin kuitujen muokkauksen työvyöhykkeen suuruutta karakterisoivia tunnuslukuja on muodostettu (22). Jauhatuksen intensiteettiä kuvaava tekijä on näitä tunnuslukuja kehiteltäessä usein jätetty huomiotta. Myös useita matemaattisesti formuloituja teräspintojen välissä vaikuttavan leikkauskentän voimakkuuden lausekkeita on yritetty käyttää jauhatusta kuvaavina tunnuslukuina mutta melko heikolla

menestyksellä. (23),(24) jne. Wultschin ja Flucherin ensi kertaa esittämässä (25) ja Brechtin et al. (10),(26) kokeellisesti verifioimassa tunnusluvussa on jauhatuksen intensiteettiä kuvaava tekijäkin otettu mukaan kuitujen muokkausvyöhykettä kuvaavan tekijän ohella ja näin päädytty ominaissärmäkuormitusteoriaan, joka tuntuu olevan merkittävä edistysaskel jauhatusprosessin hallintaan tähtäävissä pyrkimyksissä.

2.3.2. Ominaisrämmäkuormitus jauhatustapahtumaa karakterisoivana tunnuslukuna

2.3.2.1. Ominaisrämmäkuormitusteorian perusteet (10)

Tuntuu selvältä, että jauhatustapahtuman kulkuun vaikuttavat eniten jauhatusvyöhykkeellä esiintyvät voimakkaimmat iskut. Tämä merkitsee sitä, että jauhimen terien kautta massaan kohdistuvat iskut määrännevät ensisijassa jauhatuksen kulun. Terien vaikutuksen voidaan ajatella koostuvan teräsärmien ja teräpintojen vaikutuksesta.

Useat tutkijat ovat korostaneet aikayksikössä toistensa ohi liikkuvien teräsärmien yhteisen pituuden merkitystä jauhatustapahtumassa. Tätä suuretta nimitetään leikkauspituudeksi ja se voidaan esittää kaavalla

$$L_s = z_r z_{st} l n \quad (1)$$

jossa

- L_s = leikkauspituus, km/s
- z_r = roottoriterien lukumäärä
- z_{st} = staattoriterien lukumäärä
- l = terän pituus, km
- n = jauhimen pyörimisnopeus, r/s

Massaan siirtyy energiaa myös teräpintojen välityksellä. Jauhatuspintaa kuvaavia suureita esiintyy kirjallisuudessa useita. Puhutaan terien kosketuspinnasta, jauhatuspinnasta, terien sivuamasta pinnasta jne. (22). Brecht käyttää ilman mitään perusteluja Jagenbergin mukaan laskettua keskimääräistä jauhatuspintaa, joka on sama kuin em. terien kosketuspinta. Keskimääräinen jauhatuspinta määritellään seuraavasti:

$$F = \frac{F_r F_{st}}{F_g} \quad (2)$$

jossa F = keskimääräinen jauhatuspinta, m^2
 F_r = roottoriterien yhteinen pinta-ala, m^2
 F_{st} = staattoriterien yhteinen pinta-ala, m^2
 F_g = peruspinta-ala, jolle jauhimen terät on sijoitettu, m^2

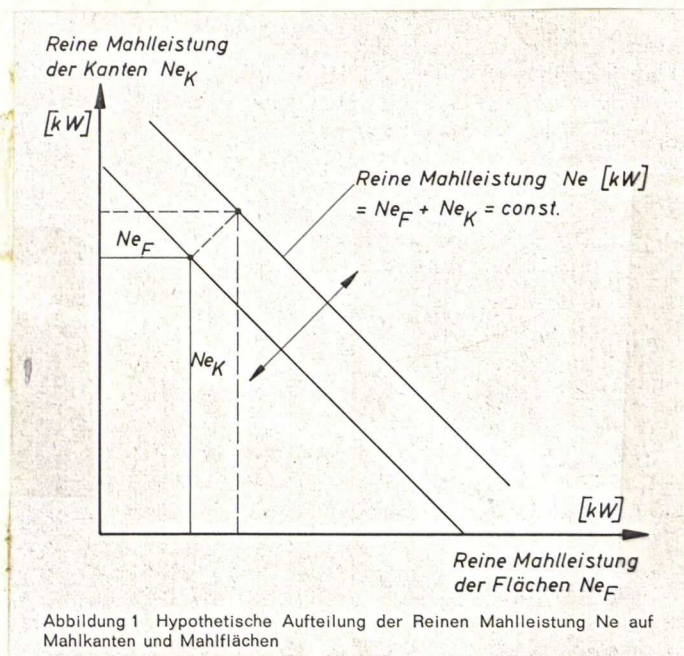
Leikkauspituus ja jauhatuspinta muodostavat vyöhykkeen, jossa kuitujen pääasiallinen muokkaaminen tapahtuu. Ne eivät kuitenkaan kerro mitään siitä voimakkuudesta, jolla särmät ja pinnat vaikuttavat. Jauhatustapahtuman arvosteluun on näin otettava mukaan suure, joka kuvaa terien vaikutuksen intensiteettiä. Terien välissä vaikuttava jauhatuspaine olisi eräs tällainen suure, mutta sen laskeminen kartio- ja levyjauhimisessa on vaikeaa, koska olisi tunnettava monista seikoista riippuva kitakerroin. Brechtin et al. mukaan on näin ollen tarkoituksenmukaista käyttää jauhatuksen intensiteetin mittana puhdasta jauhatukseen kuluva tehoa, joka saadaan vähentämällä jauhimen kokonaisakselitehosta mekaaninen ja hydraulinen häviöteho (= veden kierrätykseen kuluva teho). Tämän puhtaan jauhatustehon katsovat Brecht et al. särmien ja pintojen välityksellä vaikuttavan massaan efektiivisenä, jauhatusta edistävänä kuorimituksena. Puhtaan jauhatustehon voidaan hypoteettisesti ajatella koostuvan kahdesta komponentista nimittäin

- särmien välityksellä massaansa vaikuttavasta puhtaasta jauhatustehosta N_{eK} ja
- pintojen välityksellä massaansa vaikuttavasta puhtaasta jauhatustehosta N_{eF} .

Puhdas jauhatusteho N_e on näin ollen

$$N_e = N_{eK} + N_{eF} \quad (3)$$

Täysin sileällä jauhinhungolla siirtyisi koko puhdas jauhatusteho massaansa pintojen välityksellä ja $N_e = N_{eF}$. Särmiäluvun kasvaessa pienenee jauhatuspinnan osalle tuleva teho-osuus, kunnes teoreettisessa rajatapauksessa esiintyy vain teräsärmiä ilman mainittavaa teräleveyyttä ja $N_e = N_{eK}$. Yhtälöstä (3) voidaan nähdä, että mielivaltaisella mutta vakioksi ajatellulla puhtaalla jauhatusteholla N_e on N_{eK} :n ja N_{eF} :n välillä lineaarinen riippuvuus. Tämä on esitetty kuvassa 5. Muutokset

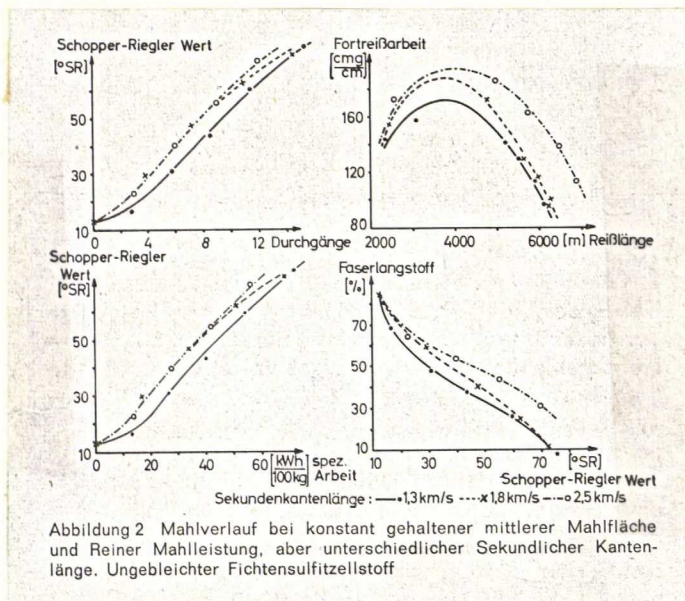


Kuva 5.

puhtaan jauhatustehon suu-
ruudessa aiheuttavat suoran
yhdensuuntaissiirtymän.
Puhtaan jauhatustehon hypo-
teettisiä komponentteja ei
mittausteknisin keinoin
voida määrittää. Saadakse-
jonkinlaisen kuvan särmien
ja pintojen kautta massa-
ansa vaikuttavien puhtaiden jau-
hatustehojen keskinäisestä
suuruudesta Brecht et al.
suorittivat jauhinkonstruk-

tion muutoksella työpisteen siirtämisen pitkin tiettyyn puhtaaseen jauha-

tustehoon kuuluvaa suoraa. Koejauhaukset suoritettiin laboratorio-
mittakaavaisella kartiojauhimella. Ensimmäisessä kokeessa muutettiin
leikkauspituutta ja pidettiin keskimääräinen jauhatuspinta vakiona.

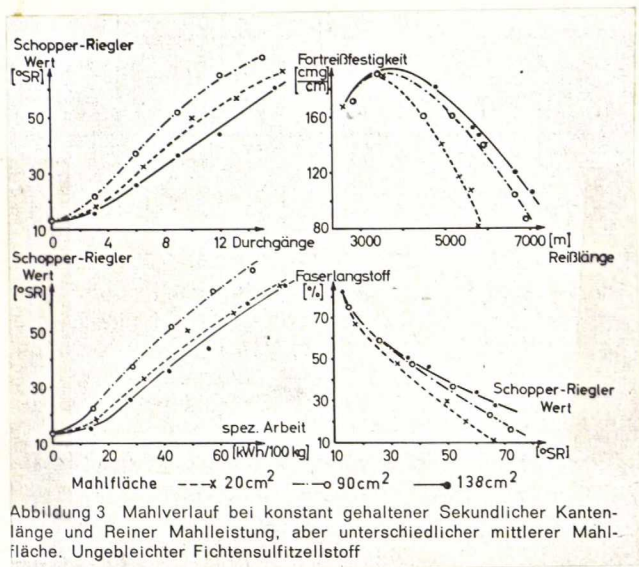


Kuva 6.

Leikkauspituuden kasvaessa ja puhtaan jauhatustehon pysyessä muuttumattomana kasvaa leikkauspituuden suhde keskimääräiseen jauhatuspintaan ja voidaan olettaa, että jauhatuspintojen välisessä leikkaus- ja kitkavoimien välityksellä massaankäyttö pienenee särmien välityksellä massaankäyttävän teho-

osuuden N_{eK} vastaavasti kasvaessa. Kuva 6. esittää saatuja koetuloksia. Kuvan oikealta puolelta nähdään, että leikkauspituuden kasvu johtaa varovampaan jauhatukseen. Tietyn jauhatustuloksen saavuttamiseen tarvittavassa jauhatuksen määrässä ei sen sijaan esiinny kovinkaan suuria eroja. Tietyn SR-luvun kehittymisenä mitatun jauhautumisen vaatima puhdas ominaisenergia kasvaa tosin leikkauspituuden kasvaessa mutta merkittävästi vasta varovammissa jauhatuksissa.

Toisessa koejauhauksessa muutettiin keskimääräistä jauhatuspintaa ja pidettiin leikkauspituus vakiona. Puhtaan jauhatustehon pysyessä vakiona kasvaa keskimääräisen jauhatuspinnan suhde leikkauspituuteen jauhatuspinnan kasvaessa ja voidaan olettaa särmien välityksellä massaankäyttävän teho-osuuden N_{eK} pienenevän N_{eF} :n kasvaessa saman verran. Kuvasta 7. nähdään, että jauhatuspinnan pienentäminen johtaa rajumpaan jauhatukseen. Vastoin edellistä koetta esiintyy nyt suuria eroja myös



Kuva 7.

tietyn SR-luvun saavuttamiseen tarvittavassa puhtaan ominaisenergian määrässä. Tietyn SR-luvun saavuttamiseen tarvittava puhdas ominaisenergia pienenee aluksi keskimääräisen jauhatuspinnan pienetessä mutta kääntyy kasvuun jauhatuspinnan edelleen pienetessä. Leikkauspituuden ollessa vakio kuvaa keskimääräinen jauhatuspinta työvyöhykettä, johon muodostuu kuitu-

ja muokkaava, puhtaan jauhatustehon N_{eF} määräämän suuruinen leikkauskenttä. Jauhatuksen määrän suhteen havaitun jauhatuspinnan optimin esiintyminen osoittaa, että leikkausvoimien ollessa liian pieniä tai liian suuria kulutetaan suuri osa energiasta hyödyttömästi.

Vertailtaessa suoritettuja koejauhatuksia nähdään, että leikkauspituuden muuttaminen likimain suhteessa 1:2 vaikuttaa jauhatuksen laatuun suurin piirtein yhtä paljon kuin keskimääräisen jauhatuspinnan muuttaminen suunnilleen suhteessa 1:7. Tämän perusteella voidaan ajatella särmien kautta massaansa vaikuttavan tehon N_{eK} olevan vaikutukseltaan paljon suuremman kuin jauhatuspinnan kautta vaikuttavan tehon N_{eF} . Vertailtaessa erilaisia tehdasjauhimia havaitaan, että leikkauspituus vaihtelee niissä huomattavasti suuremmissa rajoissa kuin keskimääräinen jauhatuspinta. Esimerkkinä esitetään oheinen taulukko kahden erikokoisen kartiojauhimen sarjavalmisteisista terälaitteistoista (8).

Tabelle 1 Daten gebräuchlicher Messergarnituren

Refiner- antrieb	Messerbreite des Rotors	Messerbreite des Stators	Sekundliche Kantenlänge	Mittlere Mahlfäche
(kW)	(mm)	(mm)	$L_s \left(\frac{\text{km}}{\text{s}} \right)$	F (cm ²)
70	3,5	3,5	28,8	230
	6,0	6,0	16,3	390
	9,5	9,5	8,8	510
120	3,5	3,5	58,4	560
	6,0	6,0	35,1	770
	9,5	9,5	19,9	1220
	14,4	14,0	11,4	1300

Keskimääräisen jauhatuspinnan arvot vaihtelevat enintään suhteessa 2:1 kun taas leikkauspituuden maksimivaihtelu on n. 5:1. Tämän ja edellä esitettyjen koejauhatusten perusteella näyttää ilmeiseltä, että teräsärmien välityksellä kuituja rasittava puhdas jauhatusteho pääasiallisesti säätelee jauhautumisen laatua, mutta tietyn jauhautumisen vaatiman puhtaan ominaisenergian määrään on lisäksi pintojen kautta sulppuun vaikuttavalla puhtaalla jauhatusteholla vaikutusta. Koska N_{eK} näyttää olevan paljon suurempi kuin N_{eF} , voidaan aproksimoiden esittää, että $N_{eK} \approx N_e$. Tällöin voidaan ajatella, että jauhatuksen laatua ja siitä riippuvaa kuitujen jauhautumisen laatua kuvaa tavallisilla jauhintyypeillä melko hyvin puhdas jauhatusteho aikayksikössä käytettävänä olevan särmäpituuden yksikköä kohti. Näin saadaan tunnusluku, jota kutsutaan ominaissärmäkuormitukseksi B_s :

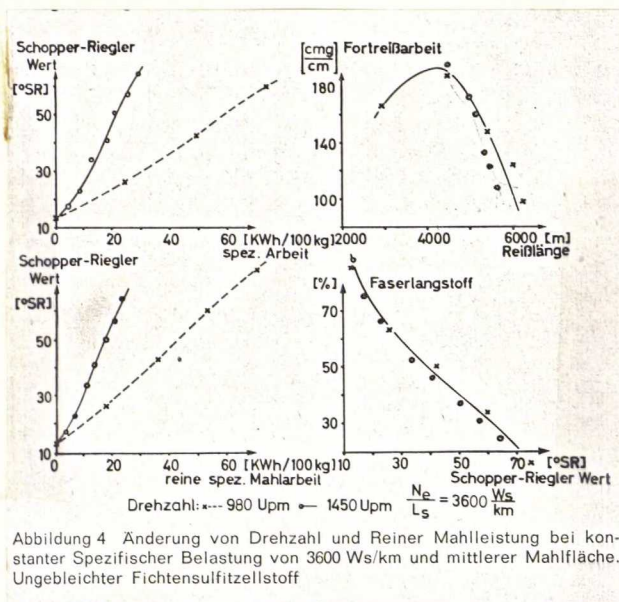
$$B_s = \frac{N_e}{L_s} \quad (4)$$

2.3.2.2. Ominaisärmäkuormitusteorian kokeellinen tutkiminen

Ominaisärmäkuormitusteorian mukaan jauhautumisen laatu pysyy muuttumattomana muuteltaessa kaavan (4) yksityisiä termejä niin, että suhde N_e/L_s

pysyy vakiona. Tietyn jauhatustuloksen saavuttamiseen tarvittava puhtaan ominaisenergian määrä ei kuitenkaan ole yksikäsitteisesti ominais-särmäkuormituksesta riippuva vaan riippuu lisäksi teräpintojen välissä vallitsevan leikkauskentän voimakkuudesta. Tutkimuksissaan ovat Brecht et al. havainneet, että staattori- ja roottoriterien lukumäärää ja pituutta sekä puhdasta jauhatustehoa voitiin mielivaltaisesti muuttella jauhatuksen laadun muuttumatta kunhan ominaissärmäkuormitus vain pidettiin vakiona (10). Eroja ei myöskään voitu havaita tietyn SR-luvun saavuttamiseen tarvittavassa puhtaan ominaisenergian määrässä.

Jauhimen pyörimisnopeuden muuttamisen ei myöskään pitäisi vaikuttaa jauhatuksen laatuun, jos vain huolehditaan, että ominaissärmäkuormitus pysyy samana. Kuva 8. esittää tuloksia kokeesta, jossa pyörimisnopeutta

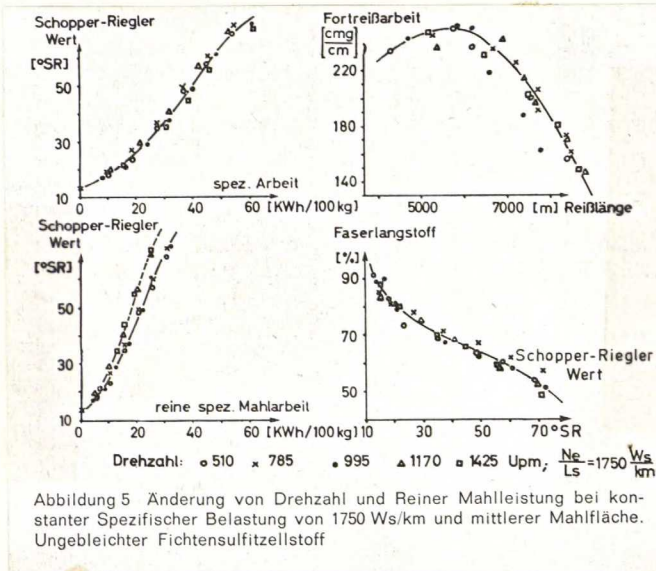


Kuva 8.

muutettiin 980 — 1450 r/min ja ominaissärmäkuormitus vakioitiin suorittamalla vastaava muutos puhtaassa jauhatustehossa. Kuvasta nähdään, että tietyllä katkeamispituuden arvolla saavutetaan molemmissa jauhatuksissa likimain sama repäisylujuus ja tietyllä SR-luvun arvolla likimain sama pitkäkuituus.

Jauhautumisen laatu on siis pysynyt muuttumattomana. Verrattaessa sen sijaan kuitujen tietyn muokkaamisen vaatimaa puhtaan ominaisenergian määrää eri jauhatuksissa havaitaan huomattavia eroja. Syynä tähän voidaan pitää erilaista leikkauskentän voimakkuutta teräpintojen välissä. Pyörimisnopeuden kasvaessa myös leikkauskentän voimakkuus kasvaa aiheuttaen havaitun muutoksen. Uusittaessa koe suuremmalla pyörimisnope-

taessa sen sijaan kuitujen tietyn muokkaamisen vaatimaa puhtaan ominaisenergian määrää eri jauhatuksissa havaitaan huomattavia eroja. Syynä tähän voidaan pitää erilaista leikkauskentän voimakkuutta teräpintojen välissä. Pyörimisnopeuden kasvaessa myös leikkauskentän voimakkuus kasvaa aiheuttaen havaitun muutoksen. Uusittaessa koe suuremmalla pyörimisnope-



Kuva 9.

usalueella mutta n. puolet pienemmällä kuormitustasolla saatiin kuvan 9. mukaisia tuloksia. Pyörimisnopeuden muuttaminen ei tässäkään sanottavasti vaikuta jauhatuksen kvalitatiiviseen puoleen ja jauhatuksen määräsäkin esiintyvät erot ovat nyt huomattavasti pienempiä. Kuormitustason pienentäminen pienentää myös leikkauskentän voimakkuutta teräpintojen välissä,

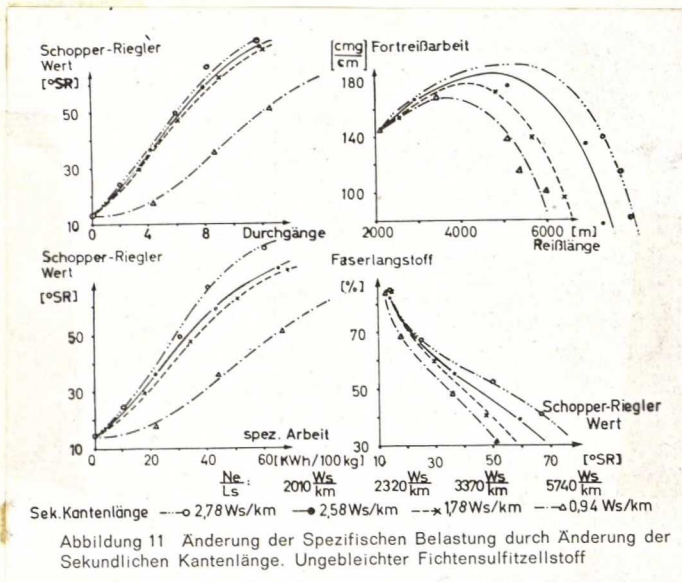
joten muutokset tässä suhteellisesti pienessä tekijässä eivät aiheuta kovin suuria muutoksia jauhatuksen määrässä. Kuvan 9. perusteella näyttää tiettyä kokonaisominaisenergiaa vastaava SR-luku olevan riippumaton jauhimen pyörimisnopeudesta. Tämä on kuitenkin vain sattuma eikä oikeuta yleisten päätelmien tekoon. Sattumalta on nimittäin pyörimisnopeuden kasvun aiheuttama puhtaan jauhatustehon ja veden kierrätyksessä kulutetun häviötehon muutos tapahtunut likimain samassa suhteessa, mikä on johtanut havaittuun erikoiseen tulokseen.

Suoritettut kokeet osoittavat, että ominaissärmäkuormituksen vakioiminen vakioi myös jauhatuksen laadun. Jauhatuksen kvantitatiivisessakaan puolella ei havaita eroja, ellei teräpintojen välissä vaikuttavaa leikkauskentän voimakkuutta muuteta. Jauhimen pyörimisnopeus vaikuttaa suuresti leikkauskentän voimakkuuteen ja aiheuttaa muutoksia myös tietyn jauhautumisen vaatimassa jauhatuksen määrässä.

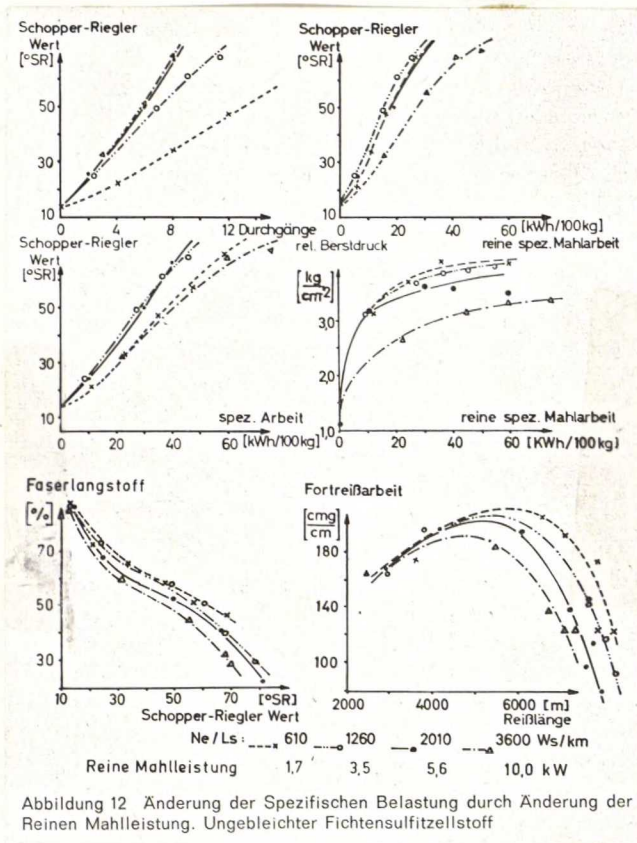
Jatkotutkimuksissaan ovat Brecht et al. (26) osoittaneet, että sama jauhatuksen laatu saavutetaan myös erityyppisillä jauhimilla kun ominais-

särmäkuormitus vakioidaan ja jauhinten leikkauskulma ja terämateriaali ovat samat.

Mitä sitten tapahtuu kun ominaissärmäkuormitusta muutetaan? Kuvassa 10.



Kuva 10.



Kuva 11.

esitetyt tulokset on saatu muuttamalla jauhimen leikkauspituutta terien pituutta muuttamalla. Leikkauspituuden kasvattaminen pitämällä puhtas jauhusteho vakiona merkitsee ominaissärmäkuormituksen pienenemistä ja jauhautuminen tulee varovammaksi.

Tietty SR-luku saavutetaan pienemmällä puhtaalla ominaisenergialla.

Ominaissärmäkuormituksen muuttaminen muuttamalla puhtasta jauhustehoa tietyllä leikkauspituuden arvolla antoi kuvan 11. mukaisia tuloksia. Ominaissärmäkuormituksen pienentäminen voimistaa jälleen jauhatusen limoittavaa vaikutusta. Tietyn jauhustuloksen saavuttamiseen tarvittavan puhtaan ominaisenergian suhteen näyttää ominaissärmäkuormituksella olevan optimi, joka käytetylle si-massalle on n. 1500 Ws/km.

2.4. Yhteenveto jauhatustulosta säätelevistä tekijöistä

Ominaisrämmäkuormitus näyttää varsin laajoissa rajoissa ohjaavan jauhautumisen laatua ja siis myös saavutettavien paperiteknillisten ominaisuuksien keskinäistä kehitymisnopeutta. Sen avulla voidaan tietyn massan ollessa kyseessä hallita jauhimen kuormituksen, pyörimisnopeuden, terien mittojen ja lukumäärän vaikutus kvalitatiiviseen jauhatustulokseen. Kehitetyn teorian ulkopuolelle jäävät massan ominaisuudet, jauhatussakeus, tilavuusvirtaus jauhimen läpi, terien materiaali ja kunto sekä leikkauskulma. Jauhatussakeuden vaikutus jauhautumistapaan on edellä esitetyn mukaisesti varsin vähäinen alle 6 %:n sakeuksissa ja tilavuusvirtauksen suuruudella ei näytä olevan minkäänlaista vaikutusta. Laadullisen jauhatustuloksen määräävät näin ensisijaisesti

- jauhettavan massan ominaisuudet,
- ominaisrämmäkuormituksen suuruus sekä
- jauhimen terämateriaali ja terien leikkauskulma.

Näiden avulla on jauhatusprosessin suunnittelu ja hallinta melko helposti toteutettavissa. Lisäksi ominaisrämmäkuormitusteoria antaa tutkimusten suorittamiseen erinomaisen hyvän perustan.

Jauhatuksen kvantitatiivista puolta ei ominaisrämmäkuormitusteoriakaan pohjalta pystytä kovin hyvin hallitsemaan. Ominaisrämmäkuormituksen ja siis jauhatuksen laadun vakioiminen määrää jauhatuksen määrällisen kulun yksikäsitteisesti vain silloin kun teräpintojen välissä vaikuttava leikkauskenttäkin pysytetään muuttumattomana tai niin pienenä, että sen vaikutus on mitätön.

Jauhimen pyörimisnopeuden tai oikeammin kehänopeuden muuttaminen muuttaa leikkauskentän voimakkuutta huomattavasti ja ellei jauhatus ole äärimmäi-

sen varovainen (hyvin pieni leikkauskentän voimakkuus) näkyy tämä muutos selvästi jauhatuksen kvantiteetissa. Pyörimisnopeuden kasvaessa leikkauskentän voimakkuus kasvaa. Koska Brechtin et al. tutkimusten perusteella leikkauskentän voimakkuudella näyttää olevan optimi tietyn jauhautumisen (SR-luvun nousuna mitattu) vaatiman puhtaan ominaisenergian suhteen, on ilmeistä, että pyörimisnopeuden vaikutus jauhatuksen kvantitatiiviseen kulkuun on riippuvainen muiden jauhatuskijöiden suuruudesta ja optimin esiintyminen on todennäköistä. Brechtin et al. tutkimuksissa on pyörimisnopeuden kasvattaminen pienentänyt tietyn jauhautumisen vaatimaa jauhatuksen määrää.

Leikkauskentän voimakkuuden optimin esiintyminen jauhatuksen kvantitatiivisen kulun suhteen näkyy myös havaittuna ominaissärmäkuormituksen optimiarvona.

Näyttää siis siltä, että puhtaana ominaisenergiana mitatusta jauhatuksen määrästä efektiivisesti jauhautumiseen kuluva osa muuttuu leikkauskentän voimakkuuden muuttuessa (kuormitus, pyörimisnopeus, jauhatuspinta tms. muuttuu). Ilmeisesti tällä efektiivisellä osalla jauhatuksen määrästä on tietty mm. massan ominaisuuksista riippuva absoluuttinen maksimi. Kuidut voivat siis yhdellä jauhatuskerralla (läpimenolla) absorpoida vain tietyn maksimimäärän energiaa. Tämä pitäne paikkansa ainakin SR-luvun nousuna (hienoaineen muodostumisena) mitatun jauhautuneisuuden suhteen. Mainitun maksimin mahdollinen esiintyminen saattaa aiheuttaa havaitun leikkauskentän voimakkuuden optimin olemassaolon. Leikkauskentän voimakkuuden ollessa niin pieni, että maksimienergiaa ei saada tuoduksi kuituihin, aiheuttaa sen kasvu jauhautumisen tehostumisen mutta maksimivoimakkuuden jälkeen jauhautuminen ei tehostu ja tuotu lisäenergia kuluu hukkaan.

Ilmeisesti myös jauhatussakeuden muuttaminen vaikuttaa teräpintojen välissä tietyllä kuormituksella vaikuttavan leikkauskentän voimakkuuteen muuttamalla kitkakerrointa jauhimen terävälissä. Tämä efekti saattaa tietyissä olosuhteissa tulla merkittäväksi ja näkyä kvantitatiivisessa jauhatustuloksessa.

3. JAUHATUKSEN TALOUDELLISUUSNÄKÖKOHDAT

3.1. Jauhatusprosessin talouden arvostelun perusteet

Jauhatusen taloudellisuutta arvosteltaessa on otettava huomioon saavutettu tuotanto ja tämän tuotannon saavuttamisen aiheuttamat kustannukset. Tuotannon suuruudesta ja halutuista paperin ominaisuuksista riippuva jauhinyksikköjen lukumäärä vaikuttaa jauhinten, sähkömoottorien ja muiden laitteiden hankintakustannusten kuoletuksiin, kunnossapito- ja asennuskustannuksiin, lattiatilakustannuksiin yms. Nämä on tietysti otettava huomioon jauhatusen taloutta arvosteltaessa, mutta niiden paikallisista olosuhteista riippuvan luonteen vuoksi on esimerkiksi tässä tutkimuksessa tarkoituksenmukaista tarkastella yhtä jauhinyksikköä jauhatusprosessin taloudellisuutta arvosteltaessa. Näin menetellen voidaan löytää aivan yleiset taloudellisuuden arvostelukriteerit, joita voidaan helposti soveltaa myös usean jauhimen tapaukseen edellä mainitut paikalliset kustannustekijät huomioonottaen.

Tarkasteltaessa jauhatusprosessia yhden jauhinyksikön kannalta voidaan jauhatusen taloudellisuuden arvostelu suorittaa seuraavien suureiden avulla:

- jauhimen kapasiteetti eli aikayksikössä tuotettu halutunlaatuinen kuituaineen määrä

- tietyn, halutun jauhautumisen määrän vaatima kokonaisominaisenergia, joka on verrannollinen tuotetun kuitumäärän hintaan.

Jauhinyksikön kapasiteetti on riippuvainen halutusta sulpun ja valmiin paperin ominaisuuskombinaatiosta. Tämän määräävät edellä esitetyn mukaisesti tietyn terämateriaalin ja leikkauskulman omaavalla jauhimella yksikäsitteisesti jauhettavan massan ominaisuudet ja ominaissärmäkuormitus. Ajatellaan, että käytetyllä massalla päästään haluttuun ominaisuuskombinaatioon käyttämällä ominaissärmäkuormitusta B_s (Ws/km) ja tuomalla massasulppuun puhdasta ominaisenergiaa määrä E_{se} (kWh/t).

Jos käytetyn jauhimen leikkauspituus on L_s (km/s), on tarvittava puhdas jauhatus-teho $N_e = B_s L_s$ (kW). Sulpun sakeuden ollessa s (g/l) ja tilavuusvirtauksen q (l/min) on yhdellä läpimenolla massaan tuotu puhdas ominaisenergia N_e/sq (kWh/t). Jos koko tarvittava puhdas ominaisenergia saadaan tuoduksi massaan läpimenojen lukumäärällä z , $E_{se} = \frac{N_e}{sq} z$. Tässä on huomattava, että energia tuodaan sulppuun jauhatuksessa N_e/sq :n suuruisissa annoksissa. z :n ollessa aina kokonaisluku täsmälleen haluttua energiaa ei yleensä saada tuoduksi sulppuun tietyillä N_e :n, s :n ja q :n arvoilla. Tämä on varsin merkittävä seikka "energia-annosten" ollessa suuria (N_e suuri, q ja s pieniä).

Jauhimen kapasiteetti (kg/h) on sq/z ja se voidaan ilmoittaa kaavalla

$$\text{Kapasiteetti} = \frac{N_e}{E_{se}} \quad (5)$$

Energiankulutuksen kannalta on ratkaiseva suure jauhimen käyttömoottorin sähköverkosta ottama teho. Jauhatusprosessin taloudellisuustarkasteluis-
sa on kuitenkin tarkoituksenmukaisempaa käyttää jauhimen akselitehoa, koska jauhimen käyttömoottori on aina mahdollista valita niin, että sen hyötysuhde on maksimi käytetyissä olosuhteissa. Jauhimen akseliteho N (kW)

koostuu puhtaasta jauhatustehosta N_e ja veden kierrätyksen avulla määritetystä häviötehosta N_h , $N = N_e + N_h$. Kulutettu kokonaisominaisenergia E_s (kWh/t) voidaan laskea puhtaasta ominaisenergiasta seuraavasti:

$$\text{Kokonaisominaisenergia } E_s = \frac{N}{N_e} E_{se} = \frac{N_e + N_h}{N_e} E_{se} \quad (6)$$

Jauhimen tehohyötysuhde $\eta = N_e/N$, joten kokonaisominaisenergia saadaan jakamalla puhdas ominaisenergia tehohyötysuhteella.

Jauhatusprosessin talouden kannalta keskeisiä suureita ovat siis

- puhdas jauhatusteho N_e , kW
- häviöteho N_h , kW
- tietyn jauhautuneisuuden vaatima puhdas ominaisenergia E_{se} , kWh/t

Merkittävä seikka taloudellisuustarkasteluissa on edellä mainitun "tietyn jauhautuneisuuden" eli tietyn jauhautumisen määrän" määrittely tai mittaaminen. Yleisimmin tutkimuksissa käytetty jauhautuneisuuden mitta on SR-luku. Koska jauhatuksen primäärisenä tavoitteena ei kuitenkaan ole hienoaineen tuottaminen, mitä SR-luku etupäässä mittaa, vaan kuitujen välisen sitoutumisen edellytysten parantaminen, tuntuisi mielekkäältä käyttää jauhautumisen määrän mittana esimerkiksi sitoutuneisuudesta suuresti riippuvaa arkin vetolujuutta. Seuraavissa tarkasteluissa SR-lukua on kuitenkin käytetty jauhautuneisuuden mittana, koska se on miltei ainoa kirjallisuudessa esitetty.

3.2. Jauhatuksen taloudellisuuteen vaikuttavia tekijöitä

3.2.1. Jauhimen rakenne

Tietty jauhautumisen laatu saavutetaan Brechtin mukaan yksikäsitteisesti tietyllä ominaissärmäkuormituksella. Jauhimen staattori- ja/tai roottoriterien lukumäärän muuttaminen vaikuttaa leikkauspituuteen.

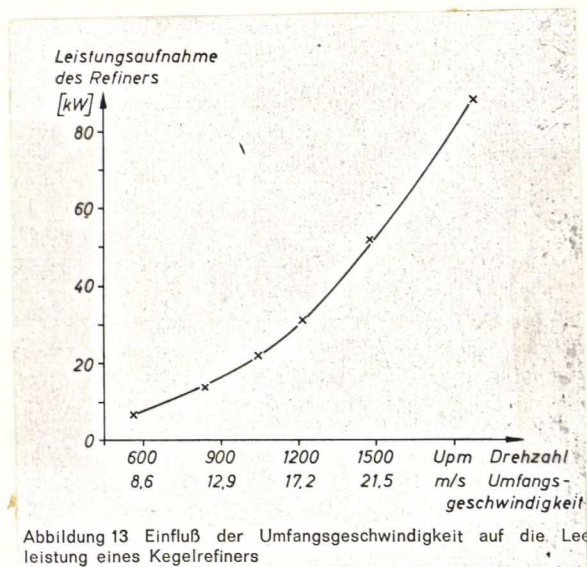
Jos terien lukumäärää lisätään täytyy puhdasta jauhatustehoa kasvattaa, jos jauhautumisen laatu halutaan säilyttää samana. Terien lukumäärän kasvattaminen lisää näin ollen jauhimen kuormitettavuutta. Kun lisäksi on havaittu (10),(11), että tietyn jauhautuneisuuden (jauhautumisen määrän) saavuttamiseen tarvittava puhdas ominaisenergia ei suurestikaan muutu terämäärää lisättäessä, lisää terien lukumäärän kasvattaminen tuntuvasti jauhinyksikön kapasiteettia. Kun häviöteho pienenee hieman terien lukumäärää lisättäessä (11), kasvaa jauhimen tehohyötysuhde huomattavasti ja kokonaisominaisenergia pienenee. Terien lukumäärän lisääminen aiheuttaa selvän tuotannon kasvun ja tuotetun kuituaineen tuotantokustannusten laskun ja parantaa siis jauhatuksen taloudellisuutta.

Terien pituuden kasvattaminen kasvattaa leikkauspituutta ja pidettäessä ominaissärmäkuormitus vakiona myös puhdasta jauhatustehoa. Tietyn jauhautuneisuuden vaatimaan puhtaaseen ominaisenergiaan ei terien pituudella näytä olevan ainakaan suurta vaikutusta (10). Näin ollen kasvaa jauhimen kapasiteetti likimain suoraan verrannollisena puhtaaseen jauhatustehoon ja terien pituuteen. Häviöteho näyttää hieman kasvavan teräpituuden kasvaessa (10), mutta koska tehohyötysuhde kuitenkin kasvaa kuormitettavuuden lisääntymisen vuoksi, laskee tuotetun kuitutonnin hinta ja tuloksena on jauhatuksen taloudellisuuden kasvu.

Keskimääräisen jauhatuspinnan muuttaminen ei ominaissärmäkuormitus-teorian mukaan suurestikaan vaikuta jauhautumisen laatuun (10). Se vaikuttaa kuitenkin huomattavasti tietyn jauhautumisen määrän saavuttamiseen tarvittavan puhtaan ominaisenergian määrään vaikuttamalla teräpintojen välissä vaikuttavan leikkauskentän voimakkuuteen (10). Edellä on havaittu jauhatuspinnalla olevan optimi tietyn jauhautumisen vaatiman jauhatuksen määrän suhteen. Ilmeisesti tämä optimin esiintyminen merkitsee optimin olemassaoloa myös jauhimen kapasiteetin suhteen. On luultavaa, että jauhatuspinnan muutokset eivät suuresti vaikuta jauhimen häviötehoon (11), joten ilmeisesti jauhatuspinnalla on olemassa tietty olosuhteista riippuva optimiarvo myös jauhatuksen taloudellisuuden suhteen.

3.2.2. Ajo-olot

Pyrittäessä tiettyyn kvalitatiiviseen jauhatus tulokseen vakioimalla ominaissärmäkuormituksen arvo pyörimisnopeuden muuttaminen aiheuttaa myös puhtaan jauhatus tehon muuttamisen samassa suhteessa. Brechtin et al. tutkimusten mukaan näyttää tietyn jauhautumisen vaatima puhtaan ominaisenergian määrä pienenevän pyörimisnopeuden kasvaessa (10), vaikka pyörimisnopeudella voidaan epäillä olevan optimi tässä suhteessa. Tämän optimin esiintyminen ja paikka lienee suuresti riippuvainen muiden jauhatusmuuttujien arvosta. Puhtaan ominaisenergian pieneneminen johtaa jauhimen kapasiteetin kasvuun ylisuhteellisesti puhtaaseen jauhatus tehoon verrattuna. Jauhimen häviöteho, jolla siis tarkoitetaan veden kierrätykseen kuluva tehoa, kasvaa erittäin voimakkaasti jauhimen pyörimisnopeuden kasvaessa. Kuva 12. esittää eräälle kartiojauhimelle määritettyä häviöteho-pyörimisnopeusriippuvuutta (26). Häviöteho kasvaa



Kuva 12.

tässä esimerkissä pyörimisnopeuden potenssissa n. 2,3. Tämä merkitsee sitä, että jauhimen tehohyötysuhde aina pienenee merkittävästi jauhimen pyörimisnopeutta kasvatettaessa.

Seuraavaan taulukkoon on laskettu Brechtin et al. eräistä tutkimustuloksista (10), (Kuva 9.) jauhimen kapasiteetti ja tarvittava kokonaisominaisenergia jauhettaessa sulppu SR-lukuun 60:

Pyörimisnopeus r/min	Kapasiteetti kg/h	Kokonaisominaisenergia kWh/t
510	56,2	470
785	90,1	443
995	123,8	445
1170	160,0	450
1425	204,2	498

Nähdään, että jauhimen kapasiteetti kasvaa huomattavasti pyörimisnopeuden kasvaessa johtuen puhtaan jauhatustehon (jauhimen kuormitettavuuden) kasvusta ja SR-luvun 60 saavuttamiseen tarvittavan puhtaan ominaisenergian lievästä pienenemisestä. Kokonaisominaisenergia pysyy likimain samana pyörimisnopeuden muuttuessa, koska tehohyötysuhde muuttuu likimain samassa suhteessa kuin puhdas ominaisenergia. Tämä ilmiö on kuitenkin vain sattuma, kuten edellä on mainittu. Jauhatus on edellä esitetyssä esimerkissä tullut taloudellisemmaksi pyörimisnopeutta kasvatettaessa kapasiteetin kasvun vuoksi. Esitettyä esimerkkiä ei kuitenkaan tule

yleistää, koska pyörimisnopeuden vaikutus tietyn jauhautuneisuuden saavuttamiseksi tarvittavan puhtaan ominaisenergian määrään näyttää olevan erilainen ainakin eri kuormitustasoilla kuten edellä on esitetty. Eräissä tapauksissa saattaa pyörimisnopeuden kasvattaminen johtaa jauhatuksen taloudellisuuden pienenemiseen. Kuvan 8. esittämässä tapauksessa on pyörimisnopeuden kasvattaminen ollut erittäin taloudellinen toimenpide, sillä tarvittava puhdas ominaisenergia pienenee huomattavasti voimakkaammin kuin tehohyötysuhde. Kapasiteetin kasvu on esimerkin tapauksessa suuri ja tuotannon kustannukset alenevat.

Jos jauhatussakeuden muutos ei vaikuta jauhatustulokseen niin kuin eräät tutkijat väittävät (14), (15), ei sakedella ole vaikutusta itse jauhatusprosessin taloudellisuuteen. Eräiden tutkijoiden (16), (17), (18) mukaan on ainakin pieni vaikutus olemassa. Tietyn jauhautuneisuuden saavuttamiseen tarvittavan puhtaan ominaisenergian kasvu sakeuden kasvaessa pienentää jauhinyksikön kapasiteettia ja kasvattaa kokonaisominaisenergiaa, joten sakeuden vaikutuksen ollessa tämänsuuntainen jauhatustulee epätaloudellisemmaksi sakeuden kasvaessa. Jos sakeuden vaikutus on päinvastainen sakeuden kasvattaminen on taloudellinen toimenpide.

Tilavuusvirtauksen suuruudella ei näytä olevan vaikutusta jauhatustulokseen. Tästä johtuen on tilavuusvirtauksen suuruus jauhinyksikön kapasiteetin kannalta merkityksetön. Häviötehon on havaittu kasvavan lineaarisesti tilavuusvirtauksen funktiona. Brechtin et al. eräässä tutkimuksessa (26) häviötehon kasvu oli n. 2 % tilavuusvirtauksen kasvaessa 100 l/min. Vaikutus on siis pieni, mutta tilavuusvirtauksen pienentäminen joka tapauksessa pienentää mainitusta syystä jonkin verran kokonaisominaisenergiaa, joka tarvitaan tietyn jauhautuneisuuden saavuttamiseen ja tekee jauhatuksen taloudellisemmaksi.

Edellä on tarkasteltu tapauksia, joissa ominaissärmäkuormitus on ollut vakio. Miten sitten ominaissärmäkuormituksen muuttaminen vaikuttaa jauhatuksen talouteen? Heti aluksi on syytä korostaa, että ominaissärmäkuormituksen muuttaminen aiheuttaa jauhautumisen laadun muuttumisen. Kuormituksen kasvaessa jauhatustapa muuttuu rajummaksi ja jauhautuminen katkovammaksi. Tästä syystä on myös jauhautumisen laadun muuttuminen otettava huomioon tässä taloudellisuustarkastelussa. Edellä on havaittu, että tietyn SR-luvun saavuttamiseen tarvittavalla puhtaan ominaisenergian arvolla on optimi ominaissärmäkuormituksen suhteen. Tämä optimi on sulfiittimassalle ominaissärmäkuormituksen arvolla n. 1500 Ws/km ja sulfaattimassalle n. kaksinkertainen. Tämä merkitsee sitä, että jauhinyksikön kapasiteetti kasvaa aluksi voimakkaasti ominaissärmäkuormituksen kasvaessa, mutta kasvu heikkenee myöhemmin. Tuotetun kuitu-tonnin hinta alenee aluksi, mutta aleneminen hidastuu suuremmilla kuormituksen arvoilla. Taloudellinen optimi lienee edellä mainittujen ominaissärmäkuormitusten paikkeilla. Tämän optimin alapuolella saavutetaan ominaissärmäkuormitusta kasvattamalla aiheutettu taloudellisuuden kasvu jauhautumisen laadun kustannuksella. Mainittakoon, että havaitun optimin esiintyminen saattaa olla kyseenalaista mitattaessa jauhautumisen määrää SR-luvun asemesta esimerkiksi vetolujuuden avulla. Tässä tapauksessa merkitsisi taloudellisuuden kasvattaminen ominaissärmäkuormitusta suurentamalla aina tinkimistä jauhautumisen laadusta.

3.3. Yhteenveto taloudellisuuteen vaikuttavista tekijöistä

Edellä esitetyn mukaan voidaan jauhatuksen taloudellisuuteen vaikuttaa useilla jauhatustekijöillä. Koska valmiin paperin ominaisuuskombinaatio on yleensä määrätty, täytyy ominaissärmäkuormitus vakioda. Useimmissa tapauksissa on taloudellista valita halutun ominaisuuskombinaation anta-

va suurin mahdollinen ominaissärmäkuormitus. Tietyllä ominaissärmäkuormituksella voidaan jauhatuksen taloudellisuutta parantaa edellä esitetyn perusteella

- lisäämällä jauhimen leikkauspituutta (teräsärmien lukumäärää ja/tai pituutta)
- etsimällä optimijauhatuspinta-ala (teräleveys)
- ainakin tietyissä olosuhteissa kasvattamalla jauhimen pyörimisnopeutta (optimin esiintyminen mahdollista)
- etsimällä optimisakeus (mikäli optimi esiintyy)
- käyttämällä pienempää tilavuusvirtausta

Edellä esitettyjä toimenpiteitä rajoittavat useat tekijät, joista mainittakoon valmistusteknilliset seikat, yhdysvaikutukset eri tekijöiden välillä (särmien lukumäärä - terien pituus - jauhatuspinta - teräleveys - haluttu jauhimen läpäisykyky jne.) sekä haluttu tuotanto (sakeus x tilavuusvirtaus). Näiden seikkojen huomioon ottaminen merkinnee mainittujen jauhatus tekijöiden optimikombinaation olemassaoloa taloudellisuuden suhteen. Tämän taloudellisen optimin vaatima jauhatus tekijöiden kombinaatio lienee riippuvainen aina kyseisistä tapauksista. Joka tapauksessa edellä esitetyt toimenpiteet antavat ne suuntaviivat, joiden mukaan taloudellisesti paras jauhatus on saavutettavissa. Lisäksi on otettava huomioon em. sulppuun tuodun ominaisenergian annosluonne, joka tulee merkittäväksi jauhimen kuormitettavuuden ollessa suuri ja sakeuden ja tilavuusvirtauksen pieni (siis muuten taloudellisissa olosuhteissa) ja halutun jauhautumisen vaatiman puhtaan ominaisenergian poiketessa paljon saavutettavista diskreeteistä energiatasoista.

B. KOKEELLINEN OSA

1. TUTKIMUKSEN TARKOITUS

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää erään tietyn terityksen omaavan kartiojauhimen toimintaa eri olosuhteissa jauhatustuloksen ja jauhatuksen talouden kannalta. Tutkittujen jauhatusmuuttujien, jauhimen kuormituksen, pyörimisnopeuden, jauhatussakeuden ja tilavuusvirtauksen vaikutus laadulliseen ja määrälliseen jauhautumiseen pyrittiin selvittämään käyttämällä tutkimuksen perustana ominaissärmäkuormitusteoriaa. Jauhatustuloksen määräytyminen ja ennustettavuus ominaissärmäkuormitus-teorian perusteella pyrittiin selvittämään. Haluttujen paperiteknillisten ominaisuuksien saavuttamismahdollisuudet ja -tavat yritettiin kartoittaa ja näistä saavuttamistavoista pyrittiin löytämään taloudellisesti edullisin jauhatustekijöiden kombinaatio. Lisäksi tutkimuksen eräänä tarkoituksena oli saatujen tulosten perusteella etsiä teknologisesti ja taloudellisesti järkevän jauhatussysteemien suunnittelun ja jauhatuksen käytännön suorituksen kriteerit tutkittujen muuttujien osalta.

2. JAUHATUSLAITTEISTO

2.1. Laitteiston yleisesittely

Tutkimusjauhimenä käytettiin Tampellan Hydrafiner 00A-tyyppistä kartiojauhinta, jonka rakenne poikkesi normaalista sikäli, että virtauspoikkipinta-ala jauhatusvyöhykkeellä pysyi vakiona n. 125 cm^2 . Muista jauhimen mitoista mainittakoon:

- roottorin pienempi halkaisija	236 mm
- roottorin suurempi halkaisija	370 mm
- keskimääräinen roottorin halkaisija	303 mm
- roottoriterien leveys	8 mm
- roottoriterien lukumäärä	36
- roottoriterien pituus	424 mm
- roottoriterien yhteinen pinta-ala	n. 1220 cm ²
- staattoriterien leveys	8-16 mm
- staattoriterien lukumäärä	45
- staattoriterien pituus	441 mm
- staattoriterien yhteinen pinta-ala	n. 2380 cm ²
- koko kartion pinta-ala	n. 3890 cm ²
- keskimääräinen jauhatuspinta (ks. kohta 2.3.2.1.)	n. 730 cm ²

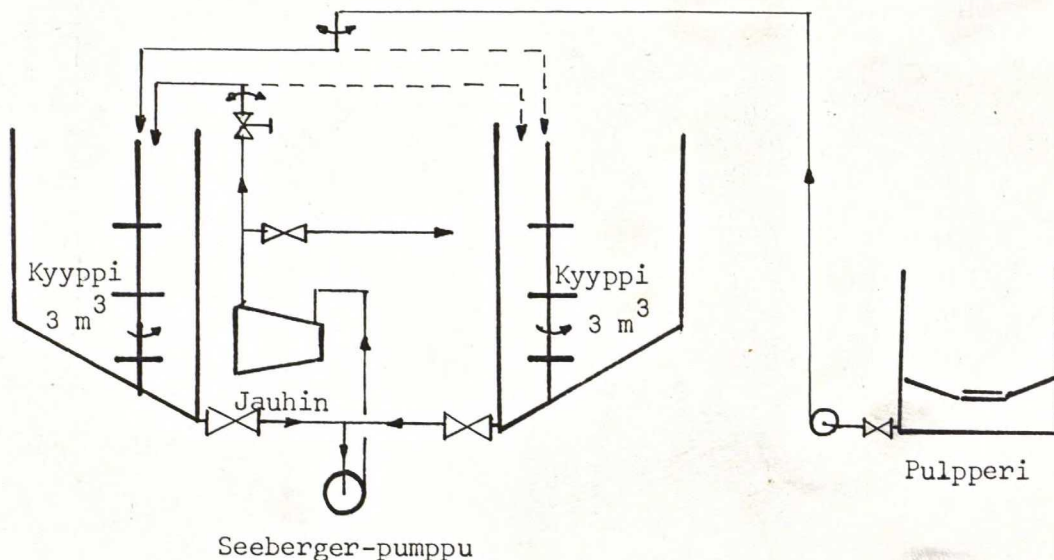
Liitteessä 1. on valokuvat jauhimen roottorista ja staattorista.

Jauhimen käyttömoottorina oli nimellisteholtaan 70 kW:n oikosulkumoottori. Moottorin ja jauhimen väliin oli sijoitettu vaihteisto pyörimisnopeuden säätämistä varten. (Valokuva jauhimesta liitteessä 2.) Jauhimen mahdolliset pyörimisnopeudet, vastaavat keskimääräiset kehänopeudet ja leikkauspituuden arvot (ks. kohta 2.3.2.1.) ovat

Vaihde	Pyörimisnopeus r/min	Kehänopeus m/s	Leikkauspituus km/s
I	230	3,7	2,7
II	450	7,1	5,3
III	850	13,5	10,0
IV	1500	23,8	17,7
V	1950	31,0	22,8

Massa syötettiin jauhimeen Seeberger-positiivipumpulla, jonka antaman tilavuusvirtauksen suuruus riippuu lineaarisesti pumpun pyörimisnopeudesta ja on käytännöllisesti katsoen riippumaton vastapaineesta. Pumpun pyörimisnopeutta ja siis tilavuusvirtauksen suuruutta säädettiin säätämällä pumppua käyttävän tasavirtamoottorin ankkuri- ja magnetoimispiirin vastuksia. Saavutettava tilavuusvirtausalue oli n. 250...550 l/min.

Jauhatusaseman laitteiden sijoitus ilmenee seuraavasta kaaviosta:

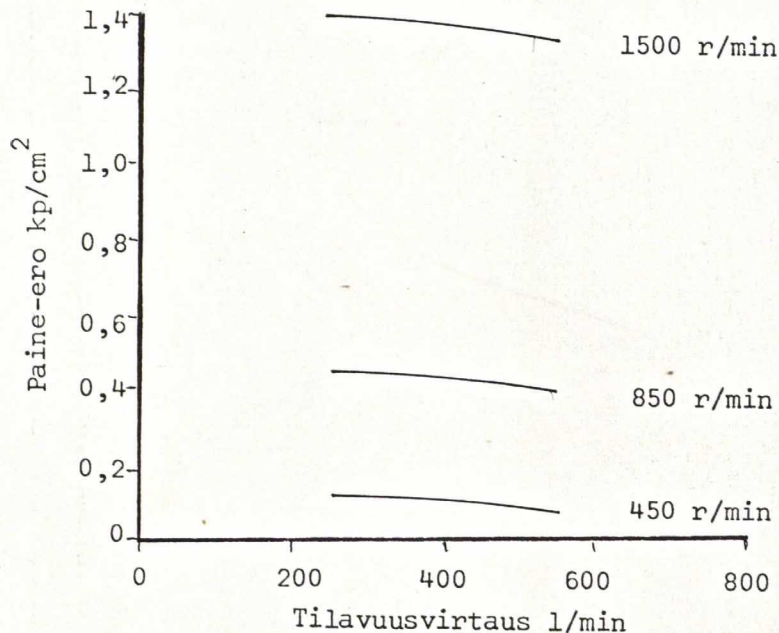


Liitteessä 2 on valokuva jauhatusasemasta.

2.2. Jauhimen pumppukäyrät

Koesuunnitelman tekoa varten määritettiin esikokein jauhimen pumppukäyrät eri pyörimisnopeuksilla kierrättämällä vettä jauhimen läpi. Tällöin havaittiin, että pyörimisnopeuden ollessa 850 r/min tai sitä suurempi jauhimen tulopuolella esiintyy pumppuvaikutuksen suuruuden ja tilavuusvirtauksen pienuuden vuoksi varsin huomattava alipaine. Jauhi-

men käyttäminen alipaineisena katsottiin epäedulliseksi ja tämän vuoksi oli virtausta kuristettava paineputkessa olevan venttiilin avulla. Jauhimen pumppukäyrät eri pyörimisnopeuksilla ja vakiolla tulopuolen paineella $0,3 \text{ kp/cm}^2$ olivat seuraavannäköiset:



Käytetyllä tilavuusvirtausalueella paine-ero riippuu vain vähän tilavuusvirtauksen suuruudesta. Pyörimisnopeus sen sijaan vaikuttaa huomattavasti paine-eroon jauhimen yli.

2.3. Jauhimen häviötehot

Jauhimen moottorin sähköverkosta ottama teho voidaan jakaa seuraaviin komponentteihin:

1. Sähkomoottorin kupari- ja rautahäviöt
2. Jauhimen ja muiden laitteiden laakereiden sekä vaihteiston mekaaniset häviöt
3. Ns. hydraulinen häviöteho, joka koostuu veden ja jauhimen epätasaisten pintojen hankaushäviöistä ja turbulenttisen virtauksen sysäys-ym. häviöistä

4. Pumppaukseen kuluva teho, johon sisältyy myös paluuvirtauksen aiheuttama, lähinnä pumppujen vuotohäviöihin verrattavissa oleva tehohäviö
5. Jauhatusvaikutuksen aikaansaamiseen kuluva teho

Brechtin et al. mukaan jauhatusvaikutuksen aikaansaamiseen kuluva teho, puhdas jauhatusteho, saadaan vähentämällä jauhimen moottorin kokonaisakselitehosta veden kierrätykseen kuluva moottorin akseliteho. Tällöin on siis otettu huomioon moottorin hyötysuhde (kupari- ja rautahäviöt eliminoitu). Kokonaishäviöteholla tarkoitetaan tässä komponenttien 2., 3. ja 4. summaa ja se saadaan mittaamalla käyttömoottorin tehonotto ajettaessa vettä jauhimen läpi ja ottamalla huomioon sähkömoottorin hyötysuhde. Käytetyn moottorin akseliteho P_2 on esitetty moottorin ottaman sähkötehon P_1 funktiona liitteessä 3.

Häviötehoja määritettäessä pidettiin jauhimen tulopuolen paine vakioarvossa $0,3 \text{ kp/cm}^2$.

Kokonaishäviöteho on esitetty pyörimisnopeuden funktiona tilavuusvirtauksen arvoilla 350 ja 500 l/min graafisesti liitteessä 4. ja numeerisesti liitteessä 58.

Liitteessä 4. on esitetty myös 3 ja 3,5 % sulpun kierrätykseen kuluva teho eri pyörimisnopeuksilla. Tämä teho on huomattavasti suurempi kuin veden kierrätykseen kuluva teho.

Esitettäessä riippuvuus kokonaishäviöteho vs. pyörimisnopeus logaritmisella asteikolla (Liite 5.) nähdään, että häviöteho on verrannollinen pyörimisnopeuden potenssiin 2,95.

Jotta saataisiin kuva häviötehon eri komponenttien suuruudesta, menetettiin seuraavasti:

- mekaanisten häviöiden suuruusluokka arvioitiin määrittämällä akseli-teho, joka kuluu tyhjän jauhimen pyörittämiseen
- efektiiviseen pumppaamiseen kuluva teho määritettiin pumppukäyrien avulla laskennallisesti (ks. kohta 2.2.)
- kokonaishäviötehosta vähennettiin em. tehojen summa, jolloin jäännöksenä jää hydraulinen häviöteho ja oikeastaan pumppaustehoon kuuluva paluuvirtauksen aiheuttama "vuotohäviö".

Tulokset tästä komponentteihinjakoyrityksestä on esitetty liitteissä 58. ja 59. Näiden tulosten perusteella voidaan havaita seuraavaa:

- Mekaaninen häviöteho on suhteellisesti suurin häviötehoKomponentti pienellä pyörimisnopeudella. Se kasvaa hieman pyörimisnopeuden kasvassa riippuvuuden ollessa lineaarinen.
- Efektiiviseen pumppaamiseen kuluva teho on verrannollinen pyörimisnopeuden toiseen (2,02) potenssiin, mutta sen osuus kokonaishäviötehosta on mitätön, keskimäärin vain n. 2 %.
- Hydraulisiin häviöihin ja paluuvirtauksen aiheuttamiin vuotohäviöihin kuluva teho on verrannollinen melko tarkasti pyörimisnopeuden kolmannen (3,03) potenssiin ja muodostaa suuremmilla pyörimisnopeuksilla ylivoimaisesti suurimman osan kokonaishäviötehosta.

Tässä yhteydessä on syytä mainita kaksi edellä esitetyllä tavalla määritettyyn häviötehoon vaikuttavaa tekijää nimittäin

- staattorin ja roottorin keskinäinen asema eli siis teräväli, jonka pienentäminen kasvattanee häviötehoa ainakin mentäessä tietyn tilavuus-^{tauksesta}virrasta ja pyörimisnopeudesta riippuvan kynnysarvon pienemmälle puolelle (tutkitulla jauhimella ei havaittu muutoksia häviötehosta pienennettäessä teräväliä hieman sen maksimiarvosta)
- virtauksen kuristuksen suuruus (pyörimisnopeudella 1500 r/min havaittiin varsin huomattava häviötehon kasvu lisättäessä kuristusta).

3. KOESUUNNITELMA

Tutkimuksessa käytettiin massana Eklöfin valkaisuamatonta kuusisulfiittiselluloosaa sen helpon jauhautuvuuden vuoksi. Koko käytetty massamäärä oli samasta keitosta. Massan kappaluku oli n. 39 ja kuiva-ainepitoisuus 88 %.

Käytetyt muuttujat olivat ominaissärmäkuormitus, jauhimen pyörimisnopeus, sulpun sakeus ja tilavuusvirtaus jauhimen läpi. Tutkimuksen kartoittavasta luonteesta johtuen pyrittiin muuttujia vaihtelevaan mahdollisimman laajoissa rajoissa. Tästä ja laitteiston asettamista rajoituksista johtuen muodostui koesuunnitelmasta varsin epäsymmetrinen.

Tutkittaviksi jauhimen pyörimisnopeuksiksi valittiin 450 r/min, 850 r/min ja 1500 r/min. Pyörimisnopeutta 1950 r/min ei laitteistolla voitu käyttää käyttömoottorin pienuuden takia. Liitteestä 4. ilmenee, että jo pelkkä häviöteho nousee tällä pyörimisnopeudella erittäin suureksi. Seuraavaan taulukkoon on laskettu käytetyillä pyörimisnopeuksilla ja erilaisilla ominaissärmäkuormituksilla tarvittava kokonaisakseliteho (kW) (= häviöteho + ominaissärmäkuormitus x leikkauspituus):

Ominaissärmäkuormitus Ws/km						
Pyörimis- nopeus r/min	600	1000	1500	2000	2500	3500
450	6,8	8,9	11,5	<u>14,1</u>	16,7	<u>22,0</u>
850	18,8	<u>22,8</u>	27,8	<u>32,7</u>	37,5	47,5
1500	69,2	<u>76,2</u>	85,0	93,8	102,1	119,6

Nähdään, että pyörimisnopeudella 1500 r/min ei käytetyllä laitteistolla voida käyttää suuria ominaissärmäkuormituksia jauhimen käyttömoottorin

pienuuden (nimellisteho 70 kW) vuoksi. Pienillä kuormituksilla ja pyörimisnopeuksilla on puhdas jauhatusteho niin pieni, että koko jauhatuskäyrän määrittämiseen tarvittavien läpimenojen lukumäärä ja jauhausaika kasvavat yli järkevien rajojen. Ominaisrämmäkuormitusta 600 Ws/km ja pyörimisnopeutta 1500 r/min vastaava kokonaisakseliteho 69,2 kW on pienempi kuin pelkästään sulpun kierrätyksen vaatima teho (Liite 4.), joten tämän pisteen käyttäminen on mahdotonta. Käytetyiksi ominaisrämmäkuormituksiksi valittiin edellä esitetyn ja Brechtin et al. tutkimusten (10) perusteella 1000, 2000 ja 3500 Ws/km ja käytetyiksi kuormitus-pyörimisnopeuskombinaatioiksi taulukossa alleviivatut.

Käytettyjen jauhatussakeustasojen lukumääräksi valittiin kaksi. Pyrkimyksenä oli käyttää normaaleja tehdasolosuhteissa käytettyjä sakeuksia, mutta laitteiston aiheuttamien rajoitusten vuoksi jouduttiin tästä vaatimuksesta tinkimään. Sulppua ei nimittäin saatu ulos pulpperista yli 3,8 %:n sakeuksissa. Toisaalta ei kovin paljon alle 3 %:n sakeuksia kannata käyttää. Näin tulivat käytetyiksi sakeustasoiksi n. 3,6 ja n. 3 %. Suuremmalla sakeudella suoritettujen jauhatusten käytännön suorituksessa esiintyi huomattavia vaikeuksia mm. jauhinta avattaessa havaitun staattoriurien tukkeutumisen vuoksi. Näiden vaikeuksien vuoksi ei sakeuden vaikutusta tutkittu kaikilla kuormitus-pyörimisnopeuskombinaatioilla.

Tilavuusvirtausta pystyttiin käytetyllä laitteistolla säätämään portaattomasti alueella n. 250...550 l/min. Pienillä tilavuusvirtauksilla havaittiin staattoriurien tukkeutumisen mahdollisuuden kasvavan. Lisäksi pyrki jauhimen syöttöpumppu pysähtelemään pienillä pyörimisnopeuksilla. Näiden seikkojen vuoksi valittiin käytetyiksi tilavuusvirtauksiksi 350 ja 500 l/min.

Lopullinen koesuunnitelma muotoutui edellä esitetyn perusteella oheisen kaavion mukaiseksi. Koepisteruutuihin on merkitty käytetty koepisteiden numerointi.

n	B _s q s	1000		2000		3000	
		3,0	3,6	3,0	3,6	3,0	3,6
450	350			11.			
	500			4.	8.	5.	
850	350	9.		10.			
	500	2.	6.	3.	7.		
1500	350						
	500	1.					

B_s = ominaissärmäkuormitus, Ws/km

n = jauhimen pyörimisnopeus, r/min

s = sulpun sakeus, %

q = tilavuusvirtaus, l/min

Eri koepisteisiin kuuluvat puhtaan jauhatustehon arvot ovat

Koepiste	Puhdas jauhatusteho
1.	17,6 kW
2., 6. ja 9.	10,0
3., 7. ja 10.	19,9
4., 8. ja 11.	10,5
5.	18,4

4. KOEAJOJEN SUORITUS

4.1. Massan sulputus

Paalimassa sulputettiin normaaliroottorilla varustetussa hydrapulpperissa seuraavissa olosuhteissa:

- täytös 1000 l
- massamäärä 45 kg abs.kuiv. (sulputussakeus 4,5 %)
- lämpötila sulputuksen alussa pyrittiin säätämään kokemuseräisesti niin, että lämpötilaksi sulputuksen lopussa saataisiin n. 25 °C
- sulputusaika 2 h 15 min

Yhtä jauhatusta varten suoritettiin kaksi sulputusta.

Käytetyn massan hajoitettavuus oli erittäin huono ja vielä käytetyn pitkähkön sulputusajankin jälkeen sulpussa oli häiritsevässä määrin kuitukimppuja. Koska sulputukseen käytettyä aikaa ei enää voitu pidentää, täytyi sulppu kuiduttaa jauhimessa ennen varsinaista jauhatusta. Pitkä sulputusaika vaikeutti myös lämpötilan säätöä, koska lämpötilan nousu sulputuksessa oli huomattava.

4.2. Sulpun kuidutus

Välittömästi toisen sulputuksen jälkeen sulppu kuidutettiin kierrättämällä sitä teriltään olevan jauhimen läpi. Jauhimen pyörimisnopeus oli 850 r/min, tilavuusvirtaus 500 l/min ja kuidutusaika sovitettiin sulpun sakeuden mukaan niin, että sulppuun tuotu ominaiskuidutusenergia (kWh/t) pyrittiin pitämään vakiona. Perustana pidettiin 15 min kierrätystä 3 %:n sakeuden omaavalle massasulpulle.

Epämääräisyyttä kuidutukseen aiheutti aika, joka varsinaisen jauhatuksen alussa kului tilavuusvirtauksen, tulopaineen ja jauhatustehon säätöön. Koska pelättiin sulpun hieman jauhautuvan kuidutuksessa, pyrittiin tämäkin ottamaan huomioon kuidutusaikaa määrättäessä. Kierrätyksen jauhava vaikutus oli kuitenkin odotettua suurempi aiheuttaen melko suuria eroja eri jauhatuksissa jauhettavan sulpun alkujauhautuneisuudessa. Varsinaisen tutkimuksen jälkeen suoritettussa kokeessa havaittiin 3 %:n sakedudessa suoritettun kierrätyksen aiheuttavan seuraavan suuruusmuutoksia massan ja aarkin ominaisuuksissa:

Kierrätys- aika	Pyörimis- nopeus	SR-luvun muutos	Katkeamis- pituuden muutos	Hajaheijastus- kertoimen muutos	Huokoisuuden muutos
min	r/min	-	m	cm ² /g	s/50 ml
10	450	+1	+100	-4	0
	850	+2	+400	-1	+2
	1500	+2	+1000	-4	+2
20	450	+1	+140	-5	0
	850	+2	+700	-5	+5
	1500	+3	+1200	-13	+8

Tämän epämääräisyyden poistaminen olisi vaatinut varsin laajan esikoesarjan suorittamisen.

4.3. Sulpun jauhatus

Varsinainen jauhatus suoritettiin jatkuvana prosessina, siis ajamalla sulppu (n. 2000 l) jauhimen läpi kyypistä toiseen kunnes halutumpituinen jauhatuskäyrä saavutettaisiin.

Jauhatuksen käytännön suorituksessa muodosti epämääräisimmän osan virtauksen suunnan vaihtaminen kyypistä toiseen sulpun loppuessa kyypistä. Kyyp-

piin oli jätettävä vähän sulppua, jotta jauhin ei missään vaiheessa jäisi tyhjiltään terilleen. Käytännössä virtauksen suunnan vaihto suoritettiin seuraavasti:

- Kun määrä kyypissä oli vähentynyt 100 litraan, jauhimesta tuleva putki käännettiin samaan kyyppiin ajaen vaihdon aikana hieman sulppua ulos prosessista. Sulppua kierrätettiin sen jälkeen jauhimen läpi kunnes siihen oli tuotu sama keskimääräinen ominaisenergia kuin muuhun sulppuun. Kierrätysaika laskettiin jakamalla kierrätettävä volyymi (100 l) tilavuusvirtauksen suuruudella. Kierrätysajat käytetyillä tilavuusvirtauksilla olivat

350 l/min 17 s ja 500 l/min 12 s.

Kierrätysajan kuluttua ohjattiin virtaus jälleen kyypistä toiseen.

Kuormituksen säätö suoritettiin muuttamalla jauhimen teräväliä kunnes käyttömoottorin tehonotto saatiin halutuksi. Halutun tehonoton suuruus saatiin lisäämällä kuhunkin koepisteeseen kuuluvaan puhtaan jauhatus-
tehon arvoon koeoloja vastaava häviöteho (Liite 4.) ja ottamalla huomioon sähkömoottorin hyötysuhde (Liite 3.). Tavoitteena olleet tehonotot eri koepisteissä olivat seuraavat:

Koepiste	Tehonotto	Koepiste	Tehonotto
1.	81,0 kW	5.	25,5 kW
2. ja 6.	26,2	9.	26,0
3. ja 7.	36,4	10.	36,2
4. ja 8.	17,3	11.	17,2

Tietyllä terävälillä pyrkii tehonotto pienenemään sulpun jauhautuessa, joten teräväliä oli sopivasti pienennettävä joka läpimenon jälkeen, jotta jauhatus-teho saataisiin pysymään samana koko jauhatuksen ajan.

Jauhimen pyörimisnopeutta muutettiin käyttömoottorin ja jauhimen välissä olevan vaihteiston avulla.

Jauhatussakeus säädettiin laimentamalla pulpperista pumpattua sulppua sopivasti kyypissä.

Tilavuusvirtauksen säätäminen tapahtui säätämällä pumpun käyttömoottorin pyörimisnopeutta. Käytettyjä tilavuusvirtauksia vastaavat, stroboskoopin avulla säädetyt pumpun pyörimisnopeudet olivat

350 l/min 546 r/min ja 500 l/min 780 r/min.

Jauhimen tulopuolen paine pyrittiin kaikissa jauhatuksissa saamaan vakioarvoon $0,3 \text{ kp/cm}^2$ (ks. kohta 2.2.) kuristamalla menoputkessa olevaa venttiiliä tarpeen mukaan. Koska kuristaminen vaikuttaa suuresti syöttöpumpun pyörimisnopeuteen ja siten myös tilavuusvirtauksen suuruuteen, jouduttiin tulopaineen vakioimisesta jonkin verran tinkimään, sillä tilavuusvirtauksen tarkkuusvaatimus oli suurempi ja prosessiolot pyrittiin saamaan halutuiksi mahdollisimman nopeasti (ks. kohta 4.2.).

Koko jauhatuskäyrän saavuttamiseksi tarvittavien läpimenojen lukumäärä arvioitiin seuraavan kaavan avulla pitäen perustana sulppuun tuodun puhtaan ominaisenergian arvoa n. 300 kWh/t:

$$z = \frac{E_{se} q_s}{N_e}$$

jossa z = läpimenojen määrä

E_{se} = puhdas ominaisenergia = n. 300 kWh/t

q = tilavuusvirtaus, l/min

s = massan sakeus, g/l

N_e = puhdas jauhatusteho, kW

Jauhatuksen aikana kerättiin 4...5 näytettä tiettyjen läpimenojen jälkeen kertymänäytteenä jauhimesta kyyppiin johtavan putken suulta.

Jauhatusia ei saatu suoritetuiksi aivan tarkasti halutuissa oloissa.

Todelliset koeolot eri jauhatuksissa käyvät ilmi liitteinä olevista koetulostaulukoista (Liitteet 65...75).

4.4. Mittaukset ja määritykset

Jauhimen tehonotto mitattiin Monax 2 mitta-arvon muuttajalla ja rekisteröitiin potentiometripiirturilla. Mittauksen periaate on selitetty liitteessä 77.

Sulppuun tuodun puhtaan ja kokonaisominaisenergian määrä eri läpimenojen jälkeen laskettiin seuraavien kaavojen mukaan:

$$E_{se} = \frac{N_e}{qs} z \quad \text{ja} \quad E_s = \frac{N_e + N_h}{qs} z$$

joissa E_{se} = puhdas ominaisenergia, kWh/t
 E_s = kokonaisominaisenergia, kWh/t
 N_e = puhdas jauhatus-teho, kW
 N_h = häviöteho, kW
 q = tilavuusvirtaus, l/min
 s = massan sakeus, g/l
 z = läpimenojen lukumäärä

Näytesulpuista määritettiin

- sulpun sakeus (2 määrittystä/jauhatuspiste)
- sulpun lämpötila elohopealämpömittarilla (1 määrittys/jauhatuspiste)
- suotautuvuus SR-laitteella (2 määrittystä/jauhatuspiste)
- suotautuvuus mitattuna suotautumisaikana arkkimuotissa (6 määrittystä/jauhatuspiste)

Massoista määritettiin myös Bauer-McNett-lajittelun fraktiot, mutta havaittaessa myöhemmin, ettei lajitin määrittysten aikana ollut asianmukaisessa kunnossa, lajittelun tulokset hylättiin epäluotettavina.

Näytesulpuista tehtiin kiertovesiarkkimuotilla (Liite 80.) arkkeja, joista määritettiin standardien mukaisesti

- tilavuuspaino (5 määrittystä/jauhatuspiste)
- potentiaalinen kutistuma liitteessä 81. esitetyn menetelmän mukaan (2 määrittystä/jauhatuspiste)
- katkaisupituus ja murtovenymä Instron-vetokojeella (10 määrittystä/jauhatuspiste)
- repäisypinta Lorentzen-Wettres-repäisykojeella 1/7-kevennetyllä heilurilla (10 määrittystä/jauhatuspiste)
- hajaheijastuskerroin Elrepho-mittarilla (5 määrittystä/jauhatuspiste)
- huokoisuus Curley-Hill-laitteella käyttäen 50 ml:n ilmamäärää (5 määrittystä/jauhatuspiste)

Määritettävien ominaisuuksien valintaperusteina on pidetty tutkimuksen tarkastuksesta johtuen niiden tärkeyttä käytännön (laaduntarkkailun) kannalta sekä niiden tehokkuutta jauhatuksen vaikutusten selvittämisessä. Käytännöllisyyden vaatimus ja työmäärä karsivat pois mikroskooppitarkastelut sekä kuitujen ominaispinta ja -tilavuusmittaukset ja niihin verrattavat määritykset.

5. TUTKIMUSTULOKSET

5.1. Tulosten tarkastelun kriteerit

Jauhatuksen määrällisestä kulusta eri jauhatuksissa pyrittiin saamaan selkoa esittämällä määritetyt massasulpun ja arkin ominaisuudet puhtaan ominaisenergian funktiona. Jauhautumisen laadun tutkimiseksi esitettiin eri sulpun ja arkin ominaisuuksia jonkin toisen ominaisuuden funktiona. Käytetyt ominaisuusparit olivat

- repäisypinta/katkeamispituus
- katkeamispituus/tilavuuspaino
- hajaheijastuskerroin/tilavuuspaino
- katkeamispituus/SR-luku
- repäisypinta/SR-luku
- tilavuuspaino/SR-luku
- hajaheijastuskerroin/SR-luku
- katkeamispituus/huokoisuus
- repäisypinta/huokoisuus

Tutkimustulosten tarkastelu suoritettiin tarkastelemalla visuaalisesti saatuja jauhatuskäyriä. Tulosten tarkastelun kriteerinä pidettiin jauhatuskäyrien ja tulosten systemaattisuutta. Niinpä on jauhatuksissa esiintyvät erot tulkittu merkitseviksi, jos

- a) eri jauhatusten jauhatuskäyrät poikkeavat toisistaan systemaattisesti koko jauhatuksen ajan ja jos
- b) eri jauhatuskäyristä tehtyt johtopäätökset eivät ole ristiriidassa keskenään.

Näin on tehty, vaikka eri jauhatuksissa saavutetut massan ja arkin ominaisuudet mahtuisivatkin kolmen toistettavuusajon perusteella lasketta-
vissa olevien 95 %:n varmuusvälien sisään.

Lisäksi on huomioitu koeoloissa esiintyneet vaihtelut ja muut hajontaa aiheuttavat seikat (ks. virhelähteet liitteessä 83.).

Tilastomatemattisten menetelmien käyttö ei suoritettussa tutkimuksessa ollut mielekkäästi toteutettavissa mm. aineiston vähyyden vuoksi, mutta edellä esitetyt tulosten tarkastelukriteeritkin lienevät varsin luotettavia.

5.2. Toistettavuustutkimukset

Halutunlaisen jauhatuksen toistettavuuden selvittämiseksi suoritettiin peräkkäin kolme rinnakkaisjauhatusta suunnilleen käytetyn koesuunnitelman keskiarvo-oloissa. Nämä olosuhteet olivat

jauhatus		1.	2.	3.
ominaissärmäkuormitus, Ws/km		1880	2020	2040
pyörimisnopeus, r/min		850	850	850
jauhatussakeus, %		2,9	2,9	2,6
tilavuusvirtaus, l/min		300	300	300
sulpun alkulämpötila, °C		29,9	26,3	23,5

Tulokset näistä jauhatuksista on esitetty graafisesti liitteissä 6. ja 7. ja numeerisesti liitteissä 60...62. Minkäänlaisia systemaattisia eroja ei jauhatuksissa ole huolimatta pienistä eroista jauhatusoloissa.

Jauhatuslaitteiston stabiilisuuden tutkimiseksi suoritettiin kaksi jauhatusta koesuunnitelman koepisteessä 3. Rinnakkaisjauhatusten välillä suoritettiin 7 muuta jauhatusta. Jauhatusolot olivat seuraavat aikaisempi jauhatus ensin mainittuna:

	jauhatus	4.	5.
ominaissärmäkuormitus Ws/km		2020	1980
pyörimisnopeus	r/min	850	850
jauhatussakeus	%	2,7	3,3
tilavuusvirtaus	l/min	500	500
alkulämpötila	°C	26,5	27,8

Tulokset jauhatuksista on esitetty graafisesti liitteissä 8. ja 9. ja numeerisessa muodossa liitteissä 63. ja 64. Jauhautumisen laadussa ei voida havaita eroja, mutta tietyn jauhautumisen vaatimassa jauhatuksen määrässä esiintyy pieniä vaihteluja. Jauhatuslaitteisto on kuitenkin melko hyvin pysynyt stabiilina.

Edellä olevan perusteella pysyi jauhinelimien kunto hyvin vakiona koko tutkimuksen ajan ja itse jauhatusmuuttujia voitiin käytetyllä laitteistolla säätää melko tarkasti. Toistettavuustutkimuksen tulokset olivat jopa yllättävän hyviä, kun otetaan huomioon ne lukuista^{at} satunnaiset virhelähteet, joita tutkimuksessa esiintyi (Liite 83.).

5.3. Ominaisärmäkuormituksen vaikutus jauhatustulokseen

Ominaisärmäkuormituksen muutoksen 1000-2000 Ws/km vaikutusta jauhatustulokseen tutkittiin pyörimisnopeudella 850 r/min kahdella sakeus- ja tilavuusvirtaustasolla. Vertailtavat jauhatukset suoritettiin koesuun-

nitelman koepisteissä 2-3, 6-7 ja 9-10. Jauhatuskäyrät on esitetty liitteissä 10...18 ja numeeriset tulokset liitteissä 66, 67, 70, 71, 73 ja 74.

Tarkasteltaessa ominaisuuksien kehittymistä puhtaan ominaisenergian funktiona voidaan ominaissärmäkuormituksen kasvattamisen 1000-2000 Ws/km havaita aiheuttavan seuraavia muutoksia tietyllä jauhatuksen määrällä saavutettavassa, eri tavoin mitatussa jauhautumisen määrässä:

Tiettyä sulppuun tuotua puhdasta ominaisenergiaa vastaava

- SR-luku ja suotautumisaika kasvavat
- tilavuuspaino kasvaa
- potentiaalinen kutistuma kasvaa
- hajaheijastuskerroin pienenee
- katkeamispituus pysyy jauhatuksen alussa likimain samana mutta pienenee jauhatuksen loppuvaiheessa ja saavutettava maksimikatkeamispituus pienenee
- repäisyypinta pienenee
- huokoisuus pienenee

Sulppuun tuodusta energiasta kuitujen katkomiseen ja hienoaineen muodostamiseen kuluva osa kasvaa selvästi kuormituksen kasvaessa. Kuitutaipuisuutta lisäävät ja sitoutumista edistävät jauhatuksen vaikutukset näyttävät niinikään tehostuvan jonkin verran. Sitoutumisen kannalta epäedullisten vaikutusten voimistumisen vuoksi näyttää resuloivaksi vaikutukseksi kuitenkin jäävän sitoutumisen pysyminen likimain samana tietyllä puhtaalla ominaisenergialla. Kuitujen tuhoutuminen näyttää voimistuvan kuormituksen kasvaessa ja kuidun oma lujuus pienenee. Kuitujen katkeamisen ja hienoaineen muodostumisen tehostuminen tietyllä puhtaalla ominaisenergialla lisää kuitujen ominaispintaa, mutta optisia kontakteja syntyy arkin tiivistyessä (huolimatta sitoutumisen pysymisestä likimain

samana) niin runsaasti, että kuormituksen kasvu pienentää hajaheijastavaa pintaa. Ominaisrämäkuormituksen kasvattaminen suurentanee puhtaasta ominaisenergiasta kuitujen muokkaukseen kuluvan pienen osan suuruutta, mutta tämä lisäjauhatusenergia näyttää kuluvan etupäässä jauhatuksen tavoitteen kannalta epäedulliseen kuitujen katkomiseen ja tuhoamiseen.

Vertailtaessa jauhautumisen laatua eri kuormituksilla suoritetuissa jauhatuksissa voidaan ominaissärmäkuormituksen kasvun n. 1000-2000 Ws/km:een nähdä aiheuttaneen seuraavia muutoksia:

- repäisypinta jää pienemmäksi tietyllä katkeamispituudella
- tietyllä tilavuuspainolla arkin katkeamispituus pienenee mutta hajaheijastuskerroin pysyy likimain samana
- tietyn SR-luvun omaavasta sulpusta tehtyjen arkkien katkeamispituus, repäisypinta ja hajaheijastuskerroin pienenevät ja tilavuuspaino kasvaa
- tietyllä huokoisuudella saavutetut katkeamispituus ja repäisypinta pienenevät

Jauhautuminen on siis kuormituksen kasvaessa muuttunut rajummaksi.

Kuitujen katkeileminen ja hienoaineen muodostuminen ovat lisääntyneet sisäiseen ja ulkoiseen fibrillaatioon verrattuina. Tietyllä arkin tiheydellä näyttää sitoutuminen olevan vähäisempää, mutta ilmeisesti runsas hienoainepitoisuus lisää optisten kontaktien lukumäärää niin runsaasti, että hajaheijastavan pinnan suuruus pysyy käytännöllisesti katsoen samana. Hajaheijastuskerroin näyttää siis riippumatta jauhatustavasta olevan yksikäsitteinen tilavuuspainon funktio. Katkovan vaikutuksen tehostuminen kuormituksen kasvaessa huonontaa sulpun suotautuvuutta pyrittäessä tiettyyn arkin vetolujuuteen ja vaikeuttaa näin vedenpoistoa paperikoneen viiraosalla.

Ominaisrämmäkuormituksen muutoksen n. 2000-3500 Ws/km vaikutusta tutkittiin pyörimisnopeudella 450 r/min vertaamalla koesuunnitelman koepisteissä 4 ja 5 suoritettuja jauhatuksia. Tulokset on esitetty graafisesti liitteissä 19...21 ja numeerisessa muodossa liitteissä 68 ja 69.

Tämän ominaisrämmäkuormituksen muutoksen aiheuttamat muutokset jauhatustuloksessa ovat täysin samansuuntaiset kuin edellä esitetyn alemmalla tasolla tapahtuneen muutoksen. Erot jauhatusten kvantitatiivisessa ja kvalitatiivisessa kulussa ovat systemaattiset, mutta huomattavasti edellä esitetyn kuormituksen muutoksen aiheuttamia pienemmät. Tämä merkitsee ilmeisesti sitä, että jo ominaisrämmäkuormituksella 2000 Ws/km on kuitujen tuhoutuminen käytetyllä massalla erittäin voimakas eikä lisäkasvu jauhatuksen rajuudessa enää sanottavasti pysty lisäämään jauhautumisen rajuutta.

5.4. Jauhimen pyörimisnopeuden vaikutus jauhatustulokseen tietyllä ominaisrämmäkuormituksella

Jauhimen pyörimisnopeuden vaikutusta jauhatustulokseen tutkittiin ominaisrämmäkuormitustasoilla n. 1000 ja n. 2000 Ws/km.

Kuormitustasolla n. 1000 Ws/km tutkittiin pyörimisnopeuden muutoksen 850-1500 r/min vaikutusta vertailemalla koepisteissä 1 ja 2 suoritettuja jauhatuksia toisiinsa. Jauhatuskäyrät on esitetty liitteissä 22...24 ja numeeriset tulokset liitteissä 65 ja 66. Tarkasteltaessa tietyn jauhatuksen määrän aikaansaamaa jauhautumisen määrää pyörimisnopeuksilla 850 ja 1500 r/min havaitaan suuremmalla pyörimisnopeudella päästävän tietyllä sulppuun tuodun puhtaan ominaisenergian määrällä pienempiin jauhatuksen mukana nousevien ominaisuuksien ja suurempiin laskevien ominaisuuksien arvoihin. Tämä merkinnee kuidun tai sen rakenneosien lujuu-

ta pienempien, jauhatuksen kannalta hyödyttömien sulppuun kohdistuvien iskujen lukumäärän kasvamista. Suurempi osa sulppuun tuodusta energiasta menee näin ollen hukkaan. Tämä tuntuu selvältä, kun tarkastellaan sulpun kierrätyksen kuluttaman puhtaan jauhatustehon osan muutosta kasvatettaessa pyörimisnopeutta 850-1500 r/min pienellä kuormitustasolla (Liite 54.). Tämä puhtaan jauhatustehon osa on kasvanut erittäin voimakkaasti. Lienee selvää, että tämä efekti pienentää jauhatusvaikutusta lisäämällä hyödyttömien nollaiskujen lukumäärää. Kasvanut leikkaus- /n kentän voimakkuus ei riitä kumoamaan tätä jauhatusvaikutusta pienentävää vaikutusta ja hukkaenergian osuus puhtaasta ominaisenergiasta kasvaa. Suuri lämpötilan nousu jauhatuksessa pyörimisnopeudella 1500 r/min heikentää myös merkittävästi jauhatusvaikutusta ja on todennäköisesti osaltaan vaikuttanut saatuihin tuloksiin.

Pyörimisnopeuden muutoksen 850-1500 r/min aiheuttamat ero eri ominaisuuskombinaatioissa (jauhautumisen laadussa) ovat seuraavat:

- tietyllä katkeamispituudella saavutetaan jauhatuksen alkuvaiheessa sama mutta jauhatuksen loppupuolella pienempi repäisypinta (alkupään erot johtuvat kuidutuksen erilaisuudesta)
- tietyllä tilavuuspainolla on katkeamispituus suurempi jauhatuksen alkuvaiheessa
- tietyllä SR-luvulla saavutettava tilavuuspaino on pienempi
- muissa ominaisuuskombinaatioissa ei näytä olevan merkittäviä eroja

Havaitut erot voidaan selittää kuidutuksen erilaisuudesta johtuviksi. Jauhautumisen laadun voidaan tutkimuksen perusteella katsoa pysyvän likimain muuttumattomana muutettaessa pyörimisnopeutta 850-1500 r/min ja pitämällä ominaissärmäkuormitus vakiona. Lämpötilan voimakas nousu suuremmalla pyörimisnopeudella suoritettussa jauhatuksessa aiheuttaa jauhatuksen loppuvaiheessa havaitun jauhautumisen rajuuden kasvun.

Ominaisrämmäkuormitustasolla n. 2000 Ws/km tutkittiin pyörimisnopeuden muutoksen 450-850 r/min vaikutusta jauhatustulokseen kahdella sakeus- ja tilavuusvirtaustasolla. Keskenään vertailtavat jauhatukset suoritettiin koepisteissä 3-4, 7-8 ja 10-11. Suurella tilavuusvirtaustasolla ja pienellä sakeustasolla ei pyörimisnopeudella näytä olevan merkittävää vaikutusta tietyllä puhtaalla ominaisenergialla saavutettuun jauhautumisen määrään. Ainoastaan repäisylujuuden paremmuus tietyllä sulppuun tuodun puhtaan ominaisenergian määrällä suurella pyörimisnopeudella suoritettussa jauhatuksessa voidaan huomata. Sen sijaan suuremmalla sakeustasolla ja pienemmällä tilavuusvirtauksella suoritetuissa jauhatuksissa voidaan pyörimisnopeuden nähdä vaikuttaneen jauhatuksen kvantitatiiviseen kulkuun. Koepisteissä 8 ja 11 suoritetuissa jauhatuksissa esiintyi vaikeuksia jauhimen tulopuolen staattoriurien tukkeutumistaipumuksen vuoksi (tukkeuma havaittu staattoriurien alkupäässä olevan terien mutkan kohdalla avattaessa jauhin). On varsin todennäköistä, että tämä ilmiö olisi esiintynyt koejauhatuksissa. Virtauksen kuristaminen jauhatusvyöhykkeen alkupäässä todettiin jauhimen tulopuolen paineen noususta jauhatuksen aikana. Tällainen virtauksen kuristuminen luonnollisesti muuttaa virtausoloja jauhimessa ja mm. kasvattanee virtausnopeutta. Varsin luultavaa on, että tällainen ilmiö aiheuttaa jauhatusvaikutuksen heikkenemisen ja olisi pääsyy havaittuihin eroihin jauhatustuloksissa. Liitteestä 54. nähdään sulpun kierrätyksen osuuden puhtaasta jauhatustehosta olevan pienillä pyörimisnopeuksilla ja suurilla kuormituksilla varsin vähäinen ja tästä syystä leikkauskentän voimakkuuden kasvu saattaa tehostaa jauhatusvaikutusta.

Lämpötilan nousu ei näissä jauhatuksissa ollut suuri, joten sen jauhatus-^{Höf} tumista heikentävä vaikutus on ollut erittäin vähäinen.

Luultavaa on, että ainakin suurin osa havaituista eroista johtuu todennäköisestä staattoriurien tukkeutumisesta.

Suurella tilavuusvirtauksella ja pienellä sakeudella ei pyörimisnopeuden muutoksella 450-850 r/min nähtyä olevan kovinkaan suurta vaikutusta jauhautumisen laatuun. Ainoa merkillepantava seikka on arkin repäisy-
lujuuden todennäköisesti hieman parempi säilyvyys suurella pyörimisnopeudella suoritettussa jauhatuksessa. Ylemmällä sakeus- ja alemmalla tilavuusvirtaustasolla suoritettu pyörimisnopeuden muutos vaikuttaa jonkin verran jauhautumisen laatuun. Staattoriurien todennäköinen tukkeutuminen näkyy erikoisen selvästi sulpun suotautuvuuden muutoksina. Tästä johtuen saavutetaan pientä pyörimisnopeutta 450 r/min käytettäessä tietyllä tilavuuspainolla, hajaheijastuskertoimen arvolla ja arkin repäisy-
lujuuden arvolla sulpun helpompi suotautuvuus. Myös katkeamispiteuden kehittymiseen puhtaan ominaisenergian funktiona oli pyörimisnopeuden muutoksella 450-850 r/min vaikutusta. Tarkasteltaessa katkeamispiteutta SR-luvun funktiona ei eri pyörimisnopeuksilla suoritetuilla jauhatuksilla ole eroa. Näyttää siis siltä, että pyörimisnopeuden muutoksesta johtuva sekundäärinen staattoriurien tukkeutumisilmiö on pääasiallisesti vaikuttanut hienoaineen muodostusta hidastavasti. Tästä johtuneen havaittu suotautuvuuden paraneminen ja sitoutuvuuden heikkeneminen (hienoaine kuitustruktuurin tiivistäjänä).

5.5. Jauhatussakeuden vaikutus jauhatustulokseen

Jauhatussakeuden vaikutusta jauhatustulokseen tutkittiin ominaissärmäkuormitustasoilla n. 1000 ja n. 2000 Ws/km.

Ominaissärmäkuormituksella n. 1000 Ws/km vertailtavat jauhatukset suoritettiin koesuunnitelman koepisteissä 2 ja 6. Tulokset on esitetty graafisesti liitteissä 34...36 ja numeerisesti liitteissä 66 ja 70.

Tulosten analysointia haittaa kuidutuksen epämääräisyydestä johtuneet suurehkot erot jauhatuskäyrien alussa.

Tietyn jauhatuksen määrän aiheuttama jauhautumisen määrä näyttää riippuvan varsin vähän jauhatussakeudesta. Tietyllä puhtaan ominaisenergian arvolla sakeuden kasvattaminen 2,8-3,6 % näyttää aiheuttaneen merkittäviä eroja vain tilavuuspainoissa ja hajaheijastuskertoimissa. Huomattavan suuret erot juuri näissä ominaisuuksissa ja muiden ominaisuuksien (lähinnä sulpun) lähes samat arvot eri jauhatuksissa antavat aiheutta epäillä jonkin virheen tapahtuneen arkinteossa tai määrityksissä. Virheen tapahtumista ei voida sitovasti todistaa, mutta se tuntuu todennäköiseltä. Tältä pohjalta voidaan jauhatuksen kvantitatiivista kulkua pitää jauhatussakeudesta riippumattomana kuormitustasolla 1000 Ws/km ja pyörimisnopeudella 850 r/min.

Tarkasteltaessa tuloksia jauhautumisen laadun kannalta voidaan havaita joitakin eroja 2,8 ja 3,6 % sakeudessa suoritetuissa jauhatuksissa. Osa näistä eroista selittyy kuidutuksen aiheuttamista eroista ja osa tilavuuspainon ja hajaheijastuskertoimen todennäköisesti virheellisistä arvoista. Kun lisäksi otetaan huomioon tulosten osittainen ristiriitaisuus, näyttää jauhautumisen laatu pysyneen melko tarkasti samana muutettaessa jauhatussakeutta tällä alhaisella kuormitustasolla.

Ominaissärmäkuormitustasolla n. 2000 Ws/km jauhatussakeuden vaikutusta tutkittiin pyörimisnopeustasoilla 450 ja 850 r/min.

Suuremmalla pyörimisnopeudella 850 r/min pyrittiin sakeuden vaikutus selvittämään vertailemalla koepisteissä 3 ja 7 suoritettuja jauhatuksia. Jauhatuskäyrät on esitetty liitteissä 37...39 ja numeeriset tulokset liitteissä 62. ja 71. Tarkasteltaessa jauhatuksen määrällistä kehittymistä näyttää sakeuden kasvu 2,7-3,7 % aiheuttaneen pieniä eroja sulpun suotau-

tuvuudessa tietyllä puhtaan ominaisenergian arvolla. Tietyllä puhtaalla ominaisenergialla saavutetun suotautuvuuden heikkeneminen jauhatussakeuden kasvaessa saattaisi olla seuraus hienoaineen muodostumisen ja/tai ulkoisen fibrillaation vähäisestä tehostumisesta. Tätä tukee myös havaittavissa oleva pieni ero hajaheijastuskertoimen alenemisessa puhtaan ominaisenergian funktiona. Erot tietyn jauhatuksen määrän aiheuttamassa jauhautumisen määrässä ovat kuitenkin melkoisen pienet.

Eri sakeuksissa suoritettujen jauhatusten jauhautumisen laadussa esiintyvät suurimmat erot johtuvat kuidutusvaiheen aiheuttamista eroista (suurimmat erot esiintyvät repäisyypinnan alkuarvoissa.) Havaitut vähäiset erot sulpun suotautuvuudessa aiheuttavat tosin pieniä eroja mutta jauhautumisen laadun voidaan tutkimuksessa katsoa olleen miltei riippumattoman jauhatussakeudesta kyseisissä olosuhteissa.

Pyörimisnopeudella 450 r/min tutkittiin jauhatussakeuden muutoksen 3,0-3,7 % vaikutusta vertailemalla koepisteissä 4 ja 8 suoritettuja jauhatuksia. Jauhatuskäyrät ovat liitteissä 40...42 ja numeeriset tulokset liitteissä 68 ja 72. Tietyllä puhtaana ominaisenergiana mitatulla jauhatuksen määrällä saavutettu jauhautumisen määrä näyttää näissä oloissa olevan jonkin verran riippuvainen jauhatussakeudesta. Tietyllä puhtaalla ominaisenergialla näyttää SR-luku, suotautumisaika, tilavuuspaino ja vetolujuus olevan pienempiä, hajaheijastuskerroin ja repäisylujuus suurempia ja arkki huokoisempi suurempaa jauhatussakeutta käytettäessä. Sakeuden kasvu näyttää näissä oloissa siis pienentäneen tietyllä jauhatuksen määrällä saavutettua jauhautumista. Suurella sakeudella todennäköisesti esiintyneellä staattoriurien tukkeutumisella lienee osuutensa havaitunlaiseen jauhatuksen kulun muutokseen (kyseessä on kohdassa 5.4. mainittu koepiste 8.).

Jauhautumisen laadussa näyttää myös esiintyvän pieniä eroja. Suuremmalla sakeudella sitoutuminen näyttää heikentyneen, jonka vuoksi katkeamispituus on tietyillä muiden ominaisuuksien arvoilla pienempi. Erot jauhautumistavassa eivät ole suuria, mutta pieni muutos rajumpaan suuntaan näyttää tapahtuneen jauhatussakeuden kasvaessa.

5.6. Tilavuusvirtauksen vaikutus jauhatus tulokseen

Tilavuusvirtauksen vaikutusta tutkittiin ominaissärmäkuormitustasoilla n. 1000 ja n. 2000 Ws/km.

Kuormitustasolla n. 1000 Ws/km tutkittiin tilavuusvirtauksen vaikutusta pyörimisnopeudella 850 r/min vertaamalla koepisteissä 2 ja 9 suoritettuja jauhatuksia. Tulokset on esitetty graafisesti liitteissä 43...45 ja tulostaulukot liitteissä 66. ja 73. Tietyllä jauhatuksen määrällä voidaan jauhautumisen määrässä havaita pieniä eroja muutettaessa tilavuusvirtausta 500-350 l/min. Tilavuusvirtauksen pienentäminen näyttää hieman pienentävän tietyllä puhtaalla ominaisenergialla saavutettua tilavuuspainoa ja kasvattavan hieman hajaheijastuskerrointa. Jokin virhe arkinteossa tai määrityksissä on todennäköinen syy tähän, sillä jauhautuminen näyttää muuten olevan täysin samanlainen eri tilavuusvirtauksilla. (Kohdassa 5.5. mainitun koepisteen 6 ja nyt kyseessä olevan koepisteen 9 arkit on ajoraporttien mukaan tehty ja tutkittu samana päivänä ja havaitut erot ovat samanlaiset.)

Jauhautumisen laatu näyttää olevan riippumaton tilavuusvirtauksen suuruudesta.

Kuormitustasolla n. 2000 Ws/km ja pyörimisnopeudella 850 r/min voidaan tilavuusvirtauksen vaikutus jauhatus tulokseen nähdä vertaamalla koepis-

teissä 3 ja 10 suoritettuja jauhatuksia. Tulokset on esitetty graafisesti liitteissä 46...48 ja numeerisesti liitteissä 67 ja 74. Tietyllä jauhatuksen määrällä saavutettu jauhautumisen määrä näyttää näissä oloissa olevan täysin riippumaton tilavuusvirtauksen suuruudesta. Tällöin ei luonnollisesti esiinny eroja myöskään eri tilavuusvirtauksilla suoritettujen jauhatusten aikaansaaman jauhautumisen laadussa.

Kuormitustasolla n. 2000 Ws/km ja pyörimisnopeudella 450 r/min käy tilavuusvirtauksen vaikutus ilmi koepisteissä 4 ja 11 suoritettujen jauhatusten vertailusta. Jauhatuskäyrät ovat liitteissä 49...51 ja numeeriset tulokset liitteissä 68 ja 75. Pienemmällä tilavuusvirtauksella (350 l/min) näyttää tietyn sulppuun tuodun puhtaan ominaisenergian aiheuttama jauhautuminen olevan vähäisempää. Staattoriurien todennäköinen tukkeutuminen koepisteessä 11 suoritettussa jauhatuksessa lienee pääsyy jauhautumisen kvantitatiiviseen erilaisuuteen (kohta 5.4. koepiste 11).

Jauhautumisen laadussa ei voida havaita merkittäviä eroja eri tilavuusvirtauksilla suoritetuissa jauhatuksissa näissäkään koeoloissa.

6. TALOUDELLISUUSTARKASTELUT

6.1. Tarkastelun perusteet

Jauhatusten taloudellisuutta vertailtiin laskemalla yhden jauhinyksikön kapasiteetti (t/vrk) ja tarvittava kokonaisominaisenergia (kWh/t) pyritäessä erilaisiin jauhautumisen määriin. Tavoitteina olevina jauhautumisen määrinä pidettiin 1000, 2000 ja 3000 m:n katkeamispituuden lisäämistä ja vertailun vuoksi myös 15 ja 25:n SR-luvun yksikön nostamista. Kapasiteetit ja kokonaisominaisenergiat eri jauhatuksissa on esitetty taulukoituina liitteessä 76. Taulukossa on esitetty myös vuorokaudessa

kulutettu kokonaisenergia eri jauhatuksissa.

Laskuissa on käytetty kokonaisakselitehoa sähkömoottorin ottaman tehon sijasta ja näin eliminoitu sähkömoottorin koon vaikutus, koska käytännössä on aina mahdollista valita kyseisen jauhatuksen kannalta sopivin käyttömoottori (hyötysuhde maksimi).

6.2. Pyörimisnopeuden vaikutus jauhatuksen talouteen tietyllä ominais- särmäkuormituksella

Jauhimen pyörimisnopeuden muutos 850-1500 r/min on ominaissärmäkuormitus-^{H_{is}} tasolla 1000 Ws/km erittäin epätaloudellista (koepisteet 2-1). Pyrittäessä tiettyyn arkin vetolujuuteen ei jauhimen kapasiteetti kasva juuri lainkaan. Tämä johtuu tietyn katkeamispituuden saavuttamiseen tarvittavan puhtaan ominaisenergian kasvusta likimain samassa suhteessa kuin puhdas jauhatusteho (kaava 5 s. 31). Tietyn vetolujuuden saavuttamiseen tarvittava ominaisenergia kasvaa kasvatettaessa pyörimisnopeutta 850-1500 r/min n. 225 % siis yli kolminkertaiseksi. Syynä tähän on osaksi puhtaan ominaisenergian kasvu mutta ennen kaikkea erittäin voimakas häviötehon kasvu (kaava 6 s. 32). Jauhimen tehohyötysuhde laskee tällä kuormitustasolla 45:stä 24 %:än (Liite 54.). Tarkasteltaessa pyörimisnopeuksia tietyn SR-luvun saavuttamisen kannalta on tilanne suurelle pyörimisnopeudelle hieman edullisempi. Jauhinyksikön kapasiteetti kasvaa tällöin n. 40 %, mutta ominaisenergian kasvu n. 130 % osoittaa pyörimisnopeuden 1500 r/min (koepisteen 1) olevan tässäkin suhteessa selvästi epätaloudellisemman.

Ominaissärmäkuormitustasolla n. 2000 Ws/km sekä alemmalla sakeus- ja ylemmällä tilavuusvirtaustasolla suoritettu pyörimisnopeuden muutos 450-850 r/min (koepisteet 4 ja 3) ei aiheuttanut merkittäviä muutoksia

tietyn jauhautumisen vaatimassa puhtaassa ominaisenergiassa (ks. 5.4.). Jauhinyksikön kapasiteetti kasvaa näin ollen likimain suoraan verrannollisena puhtaaseen jauhatustehoon tullen pyörimisnopeudella 850 r/min noin kaksinkertaiseksi. Kun tehohyötysuhde laskee kyseisessä muutoksessa n. 75:stä n. 61 %:en (Liite 54.), kasvaa tiettyyn jauhautumiseen tarvittava kokonaisominaisenergia n. 20 %. Jauhimen kapasiteetin huomattava kasvu (n. 90 %) on kuitenkin etu, joka tekee pyörimisnopeuden 850 r/min käytön taloudellisesti edullisemmaksi. Onhan tarvittava jauhinten lukumäärä tällöin vain n. puolet pyörimisnopeudella 450 r/min tarvittavasta. Jauhinten, käyttömoottorien, putkistojen ym. laitteiden hankinta- sekä lattiatila-, korjaus-, asennus- yms. kustannukset huomioonottaen tulee pyörimisnopeuden 850 r/min käyttö varmasti edullisemmaksi.

Kuormituksella 2000 Ws/km ja ylemmällä sakeustasolla pienenee tietyn jauhautumisen vaatima puhdas ominaisenergia huomattavasti lisättäessä pyörimisnopeutta 450-850 r/min (koepisteet 8 ja 7) luultavasti koepisteessä 8 epäillyn staattoriurien tukkeutumisen vuoksi. Kun jauhimen kuormitettavuus lisäksi kasvaa, jauhinyksikön kapasiteetti tulee merkittävästi suuremmaksi. Tietyn vetolujuuden ollessa tavoitteena on kasvu lähes 300 % ja tietyn SR-luvun n. 170 %. Tietyn katkeamispiteuden saavuttamiseen tarvittava kokonaisominaisenergia pienenee n. 40 % ja tietyn SR-luvun n. 20 % huolimatta tehohyötysuhteen kasvusta. Pyörimisnopeuden kasvattaminen 450-850 r/min on näissä oloissa ollut taloudellinen toimenpide.

Kuormituksella n. 2000 Ws/km ja pienellä tilavuusvirtaustasolla pienentää pyörimisnopeuden kasvattaminen 450-850 r/min (koepisteet 11 ja 10) tietyn jauhautumisen saavuttamiseen tarvittavan puhtaan ominaisenergian määrää (5.4.) luultavasti koepisteessä 11 epäilystä teräurien tukkeutumisesta johtuen. Jauhimen kapasiteetti kasvaa tästä syystä tietyn katkeamis-

pituuden ollessa tavoitteena n. 90 % ja tietyn SR-luvun n. 170 %. Tietyn katkeamispituuden saavuttamiseen tarvittava kokonaisominaisenergia kasvaa n. 25 % ja tietyn SR-luvun laskee n. 15 %. Näissäkin oloissa näyttää siis pyörimisnopeus 850 r/min olleen taloudellisesti edullisempi kuin 450 r/min.

6.3. Jauhatussakeuden vaikutus jauhatuksen talouteen

Ominaisrämmäkuormitustasolla n. 1000 Ws/km ei sakeuden kasvattamisella 2,8-3,6 % (koepisteet 2 ja 6) näyttänyt olevan kovinkaan suurta vaikutusta tietyn jauhautumisen vaatimaan puhtaan ominaisenergian määrään (ks. 5.5.). Sakeuden muutoksen aiheuttamat muutokset jauhimen kapasiteetissa ja kokonaisominaisenergiassa ovat näin ollen tuskin merkittäviä. Tietyn katkeamispituuden ollessa tavoitteena on laskettu kapasiteetti hieman runsaan 10 % pienempi ja tietyn SR-luvun saman verran suurempi suurella sakeudella. Kokonaisominaisenergiassa esiintyvät erot ovat suhteellisesti samaa luokkaa ja myös ristiriitaiset. Nämä erot voivat johtua pelkästä määritysten hajonnasta, joten jauhatussakeudella tuskin on näissä oloissa vaikutusta jauhatuksen talouteen.

Kuormitustasolla n. 2000 Ws/km ja pyörimisnopeudella 850 r/min (koepisteet 3 ja 7) näyttää tietyn katkeamispituuden saavuttamiseen tarvittava puhdas ominaisenergia olevan likimain riippumaton jauhatussakeudesta ja tietyn SR-luvun saavuttamiseen tarvittava puhdas ominaisenergia pienenevän hieman. Tietyn katkeamispituuden saavuttamisen ollessa tavoitteena tuntuvat lasketut jauhimen kapasiteetin pieni kasvu ja kokonaisominaisenergian vastaava pieneneminen sakeuden kasvaessa johtuvan näin ollen vain koetulosten hajonnasta. Huolimatta SR-luvun nousun suhteen havaitusta pienestä taloudellisuuden kasvusta voidaan jauhatuksen taloudelli-

suuden sanoa olleen käytännöllisesti katsoen riippumattoman jauhatussakeudesta näissä koeoloissa.

Ominaissärmäkuormitustasolla n. 2000 Ws/km ja pyörimisnopeudella 450 r/min aiheutti sakeuden kasvu 3,0-3,7 % (koepisteet 4 ja 8) merkittävän kasvun tietyn jauhautumisen vaatimassa puhtaassa ominaisenergiassa (ks. 5.5.). Tietyn katkeamispituuden ollessa jauhatuksen tavoitteena pienenee jauhin-yksikön kapasiteetti likimain puoleen ja tietyn SR-luvun n. 10 %. Vastaavasti kasvavat tietyn katkeamispituuden ja SR-luvun saavuttamiseen tarvittavat kokonaisominaisenergiat. Sakeuden kasvattaminen on siis pyörimisnopeudella 450 r/min ollut huomattavan epätaloudellinen toimenpide.

6.4. Tilavuusvirtauksen vaikutus jauhatuksen talouteen

Ominaissärmäkuormituksella n. 1000 Ws/km ja pyörimisnopeudella 850 r/min ei tilavuusvirtauksen muutoksella 500-350 l/min (koepisteet 2-9) havaittu olevan merkitsevää vaikutusta tietyn jauhautumisen määrän vaatimaan puhtaaseen ominaisenergiiaan (ks. 5.6.). Jauhimen kapasiteetti ei näin ollen merkittävästi muutu tilavuusvirtauksen pienetessä (tietty katkeamispituus n. - 10 %, tietty SR-luku \pm 0 %). Koska jauhimen tehohyötysuhteen pieneneminenkin on merkityksetön (45-44 %), ei tietyn jauhautumisen saavuttamiseen tarvittavassa kokonaisominaisenergiassakaan esiinny merkitseviä muutoksia (tietty katkeamispituus n. + 10 %, tietty SR-luku n. - 3 %). Tilavuusvirtauksella ei näissä oloissa ole ollut merkitsevää vaikutusta jauhatuksen talouteen.

Ominaissärmäkuormituksella n. 2000 Ws/km ja pyörimisnopeudella 850 r/min tilavuusvirtauksella ei ole vaikutusta tietyn vetolujuuden ja SR-luvun

saavuttamiseen tarvittavaan puhtaan ominaisenergian määrään (ks. 5.6. koepisteet 3 ja 10). Jauhimen kapasiteetti on siis riippumaton tilavuusvirtauksen suuruudesta. Tehohyötysuhteen pieneneminen tilavuusvirtauksen pienetessä on suuremmasta kuormitustasosta johtuen vielä mitättömämpi kuin edellä ja kokonaisominaisenergiakin on näin ollen käytännöllisesti katsoen riippumaton tilavuusvirtauksen suuruudesta. Tilavuusvirtauksella ei siis näissäkään koeoloissa ole merkittävää vaikutusta jauhatuksen talouteen.

Ominaisrämmäkuormituksella n. 2000 Ws/km ja pyörimisnopeudella 450 r/min aiheutti tilavuusvirtauksen pieneneminen 500-350 l/min (koepisteet 4-11) merkitsevän kasvun tietyn jauhautumisen vaatimassa puhtaan ominaisenergian määrässä (ks. 5.6.). Tämän vuoksi laskee jauhimen kapasiteetti n. 10 % tietyn katkeamispituuden ja n. 20 % tietyn SR-luvun ollessa tavoitteena. Tietyn katkeamispituuden saavuttamiseen kuluu pienemmällä tilavuusvirtauksella ehkä hieman enemmän kokonaisominaisenergiaa ja tietyn SR-luvun saavuttamiseen tarvittava kokonaisominaisenergia kasvaa n. 30 %. Tilavuusvirtauksen pienentäminen 500-350 l/min pyörimisnopeudella 450 r/min näyttää siis olleen epätaloudellista.

6.5. Ominaisrämmäkuormituksen vaikutus jauhatuksen talouteen

Ominaisrämmäkuormituksen merkitys jauhatuksen taloudessa ei ole arvosteltavissa täysin samoin perustein kuin edellä esitettyjen muiden jauhustekijöiden, koska jauhautumisen laatu muuttuu huomattavasti ominaisrämmäkuormitusta muutettaessa. Ominaisrämmäkuormituksen muuttaminen muuttaa merkittävästi saavutettavaa arkin ominaisuuskombinaatiota. Sen kasvattaminen tekee jauhautumisen rajummaksi ja esimerkiksi tietyillä vetolujuuksilla saavutetaan pienemmät repäisylujuudet.

Ominaissärmäkuormituksen kasvattaminen 1000-2000 Ws/km merkitsee puhtaan jauhatustehon kasvamista kaksinkertaiseksi, ja koska tietyn katkeamis-pituuden saavuttamiseen tarvittava puhdas ominaisenergia oli miltei riippumaton kuormituksesta erittäin pitkälle vietyä jauhatusta lukuun-ottamatta (ks. 5.3.), kasvaa jauhimen kapasiteetti likimain kaksinkertai-seksi. Kun tehohyötysuhde kasvaa samalla 45...61 %:en, pienenee tietyn katkeamispituuden saavuttamiseen tarvittava kokonaisominaisenergia n. 30 %. Jauhatuksen taloudellisuus tietyn vetolujuuden saavuttamisen suhteen on siis kasvanut, mutta tämä kasvu on tapahtunut jauhautumisen laadun kus-tannuksella (esim. repäisylujuus kärsinyt selvästi). Tietyn SR-luvun saavuttamisen ollessa tavoitteena kasvaa jauhinyksikön kapasiteetti n. 125 % ja kokonaisominaisenergia pienenee n. 35 %.

Ominaissärmäkuormituksen kasvattaminen 2000-3500 Ws/km lisää myös hieman jauhatuksen taloudellisuutta tietyn vetolujuuden ja SR-luvun saavuttami-sen suhteen lähinnä kapasiteetin kasvun vuoksi (tietty katkeamispituus n. + 40 %, tietty SR-luku n. 80 %). Tehohyötysuhde kasvaa n. 75...84 %:än (Liite 54.). Kokonaisominaisenergian tarpeessa ei kuitenkaan esiinny suu-ria eroja. Koska jauhautumisen laatu ei enää näin suurilla kuormituksil-la sanottavasti huonone jauhatustavan rajuutta lisättäessä, on tapauksissa, joissa esimerkiksi repäisylujuudella ei ole kovin suurta merkitystä, edul-lista käyttää suurempaa ominaissärmäkuormitusta.

7. YHTEENVETO TUTKIMUKSESTA

7.1. Jauhatustuloksen määräytyminen tutkittujen jauhatustekijöiden perusteella

Tässä vaiheessa on heti alussa syytä kiinnittää huomiota eräisiin tutkimuksessa esiintyneisiin hallitsemattomiin jauhatustekijöihin, jotka voivat vaikuttaa jauhatustulokseen tutkittujen tekijöiden taustalla. Ensinnäkin tutkimuksessa tehdyt ominaissärmäkuormituksen muutokset tapahtuivat puhdasta jauhatustehoa muuttamalla ja pitämällä jauhimen teritys samana. Tällöin on kuitenkin myös ominaispintakuormitus muuttunut samassa suhteessa. Pyörimisnopeutta muutettaessa pidettiin ominaissärmäkuormitus vakiona, mutta aikayksikössä toisiaan vastaan toimivien pintojen lisääntyessä samassa suhteessa kuin leikkauspituus on myös ominaispintakuormitus pysynyt samana. Näin ollen voidaan tutkimuksessa katsoa tutkitun vain eräänlaisen ominaiskuormituksen merkitystä jauhatustuloksen määräytymisessä.

Toinen huomionarvoinen seikka on jauhatustekijöiden muutoksen aiheuttamat muutokset jauhatusvyöhykkeellä vallitsevilla sulpun virtausoloissa. Aina-
kin pyörimisnopeuden muuttamisella on tässä suhteessa merkitystä. Virtaus-
oloilla lienee vaikutusta jauhatustulokseen (ainakin jauhatuksen kvan-
titeettiin), mutta tämän vaikutuksen osuutta jauhatustuloksen määräytymi-
sessä ei tässä tutkimuksessa voida selvittää puutteellisen virtausolojen
tuntemuksen vuoksi.

Systemaattisena hallitsemattomana jauhatustekijänä esiintyi tutkimuksessa lisäksi sulpun lämpötila jauhatuksessa. Lämpötilan nousu jauhatuksessa vaikuttanee ainakin jonkin verran jauhatustulokseen. Tämä jauhatuksen aikana tapahtuva sulpun lämpeneminen vaihteli tutkimuksessa jauhatuksesta

toiseen ja lienee aiheuttanut ainakin pieniä eroja jauhautumisessa. Mainittakoon, että lämpötilan nousun havaittiin olevan suoraan verrannollisen jauhimeen tuotuun kokonaisominaisenergiaan niin, että 100 kWh/t kohotti lämpötilaa n. 1°C (Liite 82).

Jauhautumisen laatuun on tutkimuksessa saatu merkittäviä eroja vain jauhimen ominaiskuormitusta muuttamalla. Joihinkin yksityisiin ominaisuuspareihin on tosin saatu pieniä eroja myös muita jauhatustekijöitä muuttamalla, mutta systemaattisuus näistä näyttää puuttuvan. Ominaiskuormituksen vakioiminen näyttää mahdollistavan jauhatussakeuden ja tilavuusvirtauksen muuttamisen jauhautumisen laadun silti ainakaan suuresti muuttumatta. Jauhimen pyörimisnopeuden kasvattaminen 450-850 r/min vakiolla ominaiskuormituksella näyttää johtavan tietyllä vetolujuustasolla hieman suurempaan repäisylujuuteen, mutta muuten ei jauhautumisen laatu näytä muuttuneen. Näin ollen näyttää ilmeiseltä, että ominaiskuormitus pääasiallisesti ohjaa jauhatuksen kvalitatiivista kulkua ja määrää saavutettavat sulpun ja valmiin paperin ominaisuuskombinaatiot. Ominaiskuormituksen kasvattaminen (jauhatustapa rajumpi) merkitsee jauhautumisen muuttumista rajumpaan suuntaan. Limoittavat, kuitujen välistä sitoutuvuutta parantavat perusvaikutukset pienenevät suhteellisesti kuitoja katkoviin tai muuten jauhatuksen tavoitteiden kannalta epäedullisiin jauhatuksen vaikutuksiin verrattuina. Ominaiskuormituksen pienentäminen johtaa jauhautumisen laadun päinvastaiseen kehittymiseen. Jauhautumisen laadun paraneminen näkyy valmiin paperin ominaisuuksissa mm. kuitulietteen suotautuvuuden paranemisena (SR-luku pienempi, huokoisuus parempi), paperin repäisylujuuden ja bulkkisuuden kasvamisena sekä opasiteetin suurenemisena tietyllä arkin vetolujuustasolla.

Liitteessä 52. on esitetty arkin repäisypinnan kehittyminen katkeamispituuden funktiona n. 3 % sakeudessa ja 500 l/min tilavuusvirtauksella

suoritetuissa jauhatuksissa. Kuvasta voidaan nähdä ominaiskuormituksen suuri osuus jauhautumisen laadun määräytymisessä. Selvempi kuva asiasta saadaan tarkastelemalla liitteessä 53. esitettyä kuvaa. Primäärisesti arkin ominaisuuskombinaation määräävä jauhatustekijä on ollut ominaiskuormitus. Tietyllä ominaiskuormituksella saavutettava ominaisuuskombinaatioalue on tosin laaja, mutta on huomattava, että alueisiin sisältyy jokainen tutkimuksessa määritetty piste kaikkine hajontoineen (Liite 83.).

Jauhatuslaitteistolla saavutettu koko ominaisuuskombinaatioalue on melko laaja. Tämä merkitsee sitä, että jo käytetyllä ominaiskuormitusalueella voidaan varsin paljon säädellä arkin ominaisuuksia. Esimerkiksi katkeamispituuden arvolla 7000 m voidaan saavuttaa repäisylujuudet n. 0,90... 0,60 m² säätämällä ominaissärmäkuormitusta n. 1000...3500 Ws/km. Jauhautumisen laatu ei kuitenkaan muutu kovin herkästi jauhatuksen rajuutta muutettaessa. Tämä on havaittu mm. toistettavuustutkimuksissa, joissa ominaiskuormitus vaihteli jonkin verran aiheuttamatta näkyviä muutoksia jauhautumisen laadussa.

Jauhautumisen määrän ja puhtaana ominaisenergiana määritellyn jauhatuksen määrän välillä ei näytä vallitsevan yhtä yksikäsitteisesti ominaiskuormituksesta riippuva yhteys.

Ominaiskuormituksen kasvaessa SR-luvun, suotautumisan, tilavuuspainon, /R huokoisuuden ja potentiaalisen kutistuman nousun sekä hajaheijastuskertoimen ja repäisypinnan laskun suuruutena mitattu jauhautumisen määrä tietyllä sulppuun tuodulla puhtaalla ominaisenergialla kasvaa. Arkin vetolujuuden kasvu näyttää sen sijaan hyvin pitkälle vietyä jauhatusta lukuunottamatta olevan riippumaton ominaiskuormituksen suuruudesta. Pitkälle viedyissä jauhatuksissa vetolujuus sen sijaan pienenee kuormituksen kasvaessa ja saavutettava vetolujuuden maksimi laskee.

Jauhatussakeudella ja tilavuusvirtauksella ei näytä olevan ainakaan suurta vaikutusta tietyllä puhtaalla ominaisenergialla aikaansaatuun jauhautuneisuuteen, ellei oteta huomioon sekundäärisesti näistä johtuvan, todennäköisen staattoriurien tukkeutumisen vaikutusta. Tämä suurella sakeudella, pienellä tilavuusvirtauksella ja pienellä pyörimisnopeudella havaittu ilmiö pienentää jauhatusvaikutusta.

Jauhimen pyörimisnopeudella sen sijaan näyttää olevan jonkinlainen vaikutus tietyllä jauhatuksen määrällä aikaansaadun jauhautumisen määrään. Jos mainittu staattoriurien tukkeutumisen jauhautumista hidastava vaikutus jätetään huomiotta, kuormitustasolla 2000 Ws/km ei voida havaita merkittäviä eroja tietyn puhtaan ominaisenergian aiheuttamassa jauhautumisen määrässä kasvatettaessa jauhimen pyörimisnopeutta 450-850 r/min. Alemmalla kuormitustasolla (n. 1000 Ws/km) suoritettu pyörimisnopeuden kasvattaminen 850-1500 r/min sen sijaan pienensi huomattavasti tietyn sulppuun tuodun puhtaan ominaisenergian aiheuttamaa jauhatusvaikutusta.

Tietyn puhtaan ominaisenergian aikaansaama jauhautumisen määrä näyttää siis ominaiskuormituksen lisäksi riippuvan ainakin jauhimen pyörimisnopeudesta. Brechtin mukaan lasketusta puhtaasta ominaisenergiasta efektiiviseen kuitujen muokkaukseen kuluvan pienen osuuden suuruus näyttää siis muuttuvan kuormituksen ja pyörimisnopeuden muuttuessa. Ominaiskuormituksen kasvaessa kuluu tästä hieman kasvaneesta efektiivisestä energiasta yhä suurempi osa kuitujen vahingoittamiseen.

Pyörimisnopeuden kasvaessa lisääntyvät kuituihin kohdistuvat heikot iskut virtauksen pyörteisyyden lisääntyessä. Tämä näkyy myös sulpun ja veden kierrätykseen kylvien tehojen erotuksen kasvusta (Liite 54). Vakioimalla ominaiskuormitus asettamalla jauhain terilleen niin paljon, että puhdas jauhatusteho saadaan pyörimisnopeutta vastaavaksi vakioituvat ilmeisesti

terävälissä vaikuttavat suuret voimat (jauhautumisen laatu pysyy samana), mutta jauhatuksen kannalta hyödyttömästi sulppuun absorpoituva energia kasvaa voimakkaasti pyörimisnopeuden kasvaessa 850-1500 r/min. Alhaisesta kuormitustasosta johtuen näkyy tämä hukkaenergian muutos selvästi tietyn jauhautumisen vaatiman puhtaan ominaisenergian määrässä. Suuremmalla kuormitustasolla tämä hukkaenergian suhteellinen osuus pienenee ja luultavaa onkin, että pyörimisnopeuksilla 850 ja 1500 r/min havaittu ero jauhusten kvantitatiivisessa kulussa pienenee kuormituksen kasvaessa ja kääntynee vihdoinkin jopa päinvastaiseksi teräpintojen välissä vaikuttavien voimien tullessa riittävän suuriksi (leikkauskentän voimakkuuden kasvaessa riittävästi)(10). Pienemmillä pyörimisnopeuksilla on kuitujen vuorovaikutus pienempi virtauksen vähäisemmän pyörteellisyyden vuoksi ja jo pienempi leikkauskentän voimakkuuden kasvu riittää kompensoimaan mainitun jauhatusvaikutusta pienentävän vaikutuksen. Näin lienee käynyt pyörimisnopeuden muutoksessa 450-850 r/min suurehkoilla kuormitustasolla n. 2000 Ws/km. Pienillä pyörimisnopeuksilla riippuneen tietyn jauhautumisen vaatima puhdas ominaisenergia varsin vähän pyörimisnopeudesta ainakin alhaisilla kuormituksilla, koska sekä leikkauskentän voimakkuus että em. jauhatusvaikutusta hidastava efekti ovat pieniä.

Kuormituksen ollessa suurempi kuin 2000 Ws/km lisääntynyt leikkauskentän voimakkuus tahostanee jauhatusvaikutusta niin, että pyörimisnopeuden muutos 450-850 r/min pienentäneen tietyn jauhautumisen vaatimaa puhtaan ominaisenergian määrää (10). Ominaiskuormituksen kasvaessa kasvaneen näin ollen se rajapyörimisnopeus, jolla tietyn jauhautumisen vaatimassa jauhatuksen määrässä alkaa esiintyä merkittäviä eroja.

Jauhimen rakenteen vaikutusta jauhatustulokseen ei tutkimuksessa pyritty selvittämään, mutta tavallaan sivutuloksena havaittu staattoriurien todennäköinen tukkeutuminen antaa aiheutta puuttua hieman tähänkin.

Pääsyynä tukkeutumiseen on pidettävä staattoriterien väärää muotoa jauhatusvyöhykkeen alussa. Terissä olevan mutkan (ks. kuva liitteessä 1.) tarkoituksena lienee lisätä kuitujen teräväliin joutumisen mahdollisuutta, mutta juuri tämä kohta tukkeutuu helposti. Sakeuden kasvu lisää tämän tukkeutumisen mahdollisuutta samoin kuin virtausnopeuden alentaminen. Suuremmilla pyörimisnopeuksilla pitää virtauksen suuri turbulenssi urat puhtaina ja tukkeutumisen mahdollisuus kasvaa näin pyörimisnopeuden pienenessä.

7.2. Tutkittujen muuttujien vaikutus jauhatuksen talouteen

Pyrittäessä haluttuun jauhautumisen laatuun eli siis tiettyyn arkin ja sulpun ominaisuuskombinaatioon on tutkimuksen mukaan edullista käyttää suurinta mahdollista ominaiskuormituksen arvoa. Jauhimen kapasiteetti nimittäin kasvaa ja kokonaisominaisenergia pienenee (Liitteet 55...57) jauhimen kuormituksen kasvaessa.

Jauhimen pyörimisnopeuden kasvaessa kasvaa puhdas jauhatusteho samassa suhteessa. Samalla kuitenkin puhtaan jauhatustehon suhde kokonaistehoon, ns. tehohyötysuhde pienenee häviötehon voimakkaan kasvun vuoksi. Jauhatuksen taloudellisuuteen lisäksi vaikuttavan tietyn jollakin tavalla mitatun jauhautumisen määrän saavuttamiseen tarvittavan puhtaan ominaisenergian muutoksista on jo edellä tehty selkoa. Jos tämä puhdas ominaisenergia kasvaa suhteellisesti vähemmän kuin puhdas jauhatusteho, kasvaa jauhimen kapasiteetti. Jos tehohyötysuhde kasvaa nopeammin kuin puhdas ominaisenergia, pienenee kokonaisominaisenergia. Tutkimuksessa on pyörimisnopeuden 850 r/min havaittu olleen käytetyistä taloudellisesti edullisimman. Puhdas jauhatusteho on tällä pyörimisnopeudella vielä melkoisen suuri, tehohyötysuhde suhteellisen hyvä ja tietyn jauhautumisen määrän saavuttamiseen tarvittava puhtaan ominaisenergian arvo alhainen. Nostet-

taessa pyörimisnopeutta 850 r/min:stä huononee tehohyötysuhde merkittävästi häviötehon erittäin voimakkaan kasvun vuoksi ja ainakin pienellä ominaiskuormituksella kasvaa tietyn jauhautuneisuuden saavuttamiseen tarvittavan puhtaan ominaisenergian määrä. Puhtaan jauhatus-tehon kasvu ei näytä riittävän kompensoimaan edellä mainittujen seikkojen jauhatuksen taloudellisuutta heikentävää vaikutusta. Jauhinyksikön kapasiteetin pysyessä miltei muuttumattomana tarvittava kokonaisominaisenergia kasvaa erittäin voimakkaasti (Liitteet 55...57).

Käytettäessä pienempää pyörimisnopeutta kuin 850 r/min pienenee jauhimen kapasiteetti merkittävästi, koska puhdas jauhatus-teho pienenee ja tietyn jauhatus-tilan saavuttamiseen tarvittava puhdas ominaisenergia pysyy likimain vakiona. Tehohyötysuhteen kasvaminen ja siitä johtuva kokonaisominaisenergian pieneneminen (Liitteet 55...57) ei alhaisilla pyörimisnopeuksilla ole riittävän suuri kompensoimaan pienen kapasiteetin aiheuttamaa taloudellisuutta heikentävää vaikutusta.

Jauhatussakeuden vaikutus jauhatuksen talouteen on riippuvainen yksinomaan tietyn jauhautuneisuuden saavuttamiseen tarvittavan puhtaan ominaisenergian muutoksista. Koska jauhatussakeudella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta jauhatuksen kvantitatiiviseen kulkuun, ei sillä tutkimuksen mukaan ole vaikutusta myöskään jauhatuksen talouteen.

Tilavuusvirtauksen suuruudella ei tutkimuksessa havaittu olevan merkittävää vaikutusta tietyn jauhautumisen määrän saavuttamiseen tarvittavan puhtaan ominaisenergian määrään. Jauhaimen kapasiteetti on näin ollen ainakin likimain riippumaton tilavuusvirtauksen suuruudesta. Tehohyötysuhde kasvaa heiman tilavuusvirtauksen pienetessä, mutta tämä ei aiheuta merkittävää muutosta jauhatuksen taloudellisuudessa.

Staattoriurien oletettu tukkeutuminen kasvatti tietyn jauhautumisen vaatimaa puhdasta ominaisenergiaa ja aiheutti näin selvän jauhatuksen taloudellisuuden huononemisen pienellä pyörimisnopeudella, suurella sakeudella ja pienellä tilavuusvirtauksella.

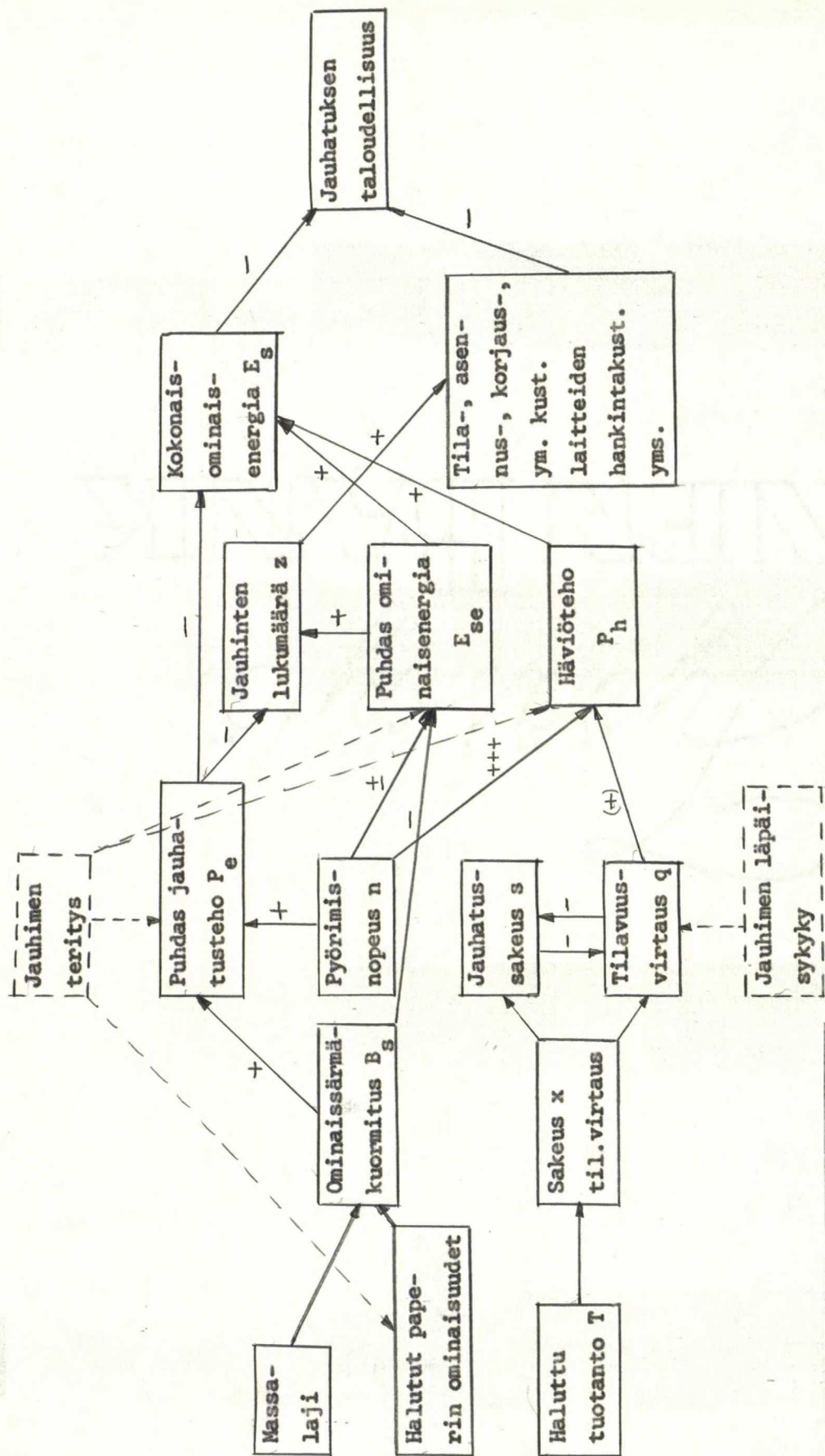
7.3. Jauhatuksen suunnittelun ja käytännön suorittamisen kriteerit tutkimuksen perusteella

Suunniteltaessa jauhatussysteemejä ja jauhatuksen järkevintä suoritustapaa on lähtökohtana pidettävä prosessin muiden osien aiheuttamia rajoituksia. Yleisimmässä tapauksessa lienee suunnittelun pohjana

- tietty massalaji
- tietty paperin ominaisuuskombinaatio ja
- tietty tuotanto.

Suoritetun tutkimuksen pohjalta on muodostettu seuraavalla sivulla oleva vaikutuskaavio, jonka pohjalta jauhatuksen suunnittelun tulisi edellä mainittujen alkuehtojen ollessa voimassa tapahtua. Kaaviosta puuttuu useita tärkeitä tekijöitä ja siinä on oletettu lisäksi jauhinten olevan sarjassa. Tässä suppeassakin muodossa lienee kaaviosta kuitenkin suunnittelun kannalta hyötyä. + -merkki kaaviossa osoittaa kyseisten suureiden välisen riippuvuuden olevan positiivinen; siis toisen suureen kasvaessa toinenkin kasvaa. - -merkki merkitsee negatiivista riippuvuutta, siis toisen suureen kasvaessa toinen pienenee ja \pm -merkintä osoittaa, että riippuvuus on muista koeoloista (esimerkiksi ominaiskuormituksen suuruudesta) riippuen joko positiivinen tai negatiivinen.

Massalaji ja haluttu paperin ominaisuuskombinaatio määräävät käytettävän ominaissärmäkuormituksen. Käytetyllä massalla on aluksi mielekästä esi-



$$\begin{aligned} T &= q_s \\ p_e &\sim B_s^n \\ p_h &\sim n^3 \end{aligned}$$

kokein etsiä maksimiominaissärmäkuorma, jolla vaaditut paperin ominaisuudet vielä voidaan saavuttaa. Haluttu tuotanto määrää sakeuden ja tilavuusvirtauksen tulon jauhatussysteemissä. Koska näillä kummallakaan ei näytä olevan vaikutusta jauhatuksen kulkuun, voidaan tilavuusvirtaus sovitaa valitun jauhimen läpäisykyvyn asettamissa rajoissa halutuksi. Sakeus määräytyy sitten tilavuusvirtauksen ja tuotannon perusteella.

Jauhimen terityksen ja pyörimisnopeuden valinnan tulee tapahtua jauhatuksen taloudellisuuden perusteella. Tällöin on otettava huomioon jauhautumisen laatuunkin vaikuttavat leikkauskulma ja terämateriaali sekä leikkauspituus ja terien pinta-ala. Jauhimen läpäisykykyyn (vapaa poikkipinta-ala) on niinikään kiinnitettävä huomiota. Leikkauspituuden, terien pinta-alan ja pyörimisnopeuden vaikutus haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseen tarvittavaan puhtaaseen ominaisenergiaan olisi tutkittava valitulla ominaissärmäkuormituksella. Näiden tekijöiden ja tilavuusvirtauksen vaikutus häviötehoon on myös selvitettävä. Jauhimen leikkauspituus ja pyörimisnopeus määräävät käytettävän puhtaan jauhatustehon. Jauhimen teritys ja pyörimisnopeus on valittava niin, että puhtaan jauhatustehon, häviötehon ja tarvittavan puhtaan ominaisenergian kombinaatio on taloudellisesti edullisin. Tämä voidaan suorittaa laskemalla tarvittava kokonaisominaisenergia puhtaan ominaisenergian ja tehohyötysuhteen (puhdas jauhatusteho/kokonaisteho) avulla sekä tarvittava jauhinten lukumäärä ja sen määräämät myös paikallisista olosuhteista riippuvat kustannustekijät. Tällöin on syytä kiinnittää huomiota myös puhtaan ominaisenergian annosluonteeseen, jolla ainakin annosten ollessa suuria (suuri puhdas jauhatusteho) on merkitystä taloudellisuustarkasteluissa.

Jauhatuksen käytännön suorittamisen kannalta on syytä kiinnittää huomiota prosessin säätöön halutun jauhautuneisuuden saavuttamiseen tarvittavan puhtaan ominaisenergian muuttuessa jostakin syystä (esim. massan ominaisuudet muuttuvat). Jos systeemi koostuu pienestä määrästä suurella puhtaalla

jauhatusteholla käytettyjä jauhimia, on järkevin säädön suorittamistapa puhtaan jauhatustehon muuttaminen. Koska pieni muutos suuressa puhtaassa jauhatustehossa ei suuresti muuta ominaissärmäkuormitusta eikä jauhautumisen laatu kovin herkästi muutu ominaissärmäkuormituksen muuttuessa, voidaan pieniä muutoksia tehdä sulpun ja paperin laadun sanottavasti kärsimättä. Tapauksissa, joissa on havaittu edulliseksi käyttää paljon pienellä puhtaalla jauhatusteholla käyviä jauhimia, lienee järkevin säätötapa muuttaa prosessissa olevien jauhinten lukumäärää. Tällöin ei jauhautumisen laatu muutu lainkaan ja säätö on sitä joustavampi, mitä enemmän jauhimia systeemissä on.

7.4. Tutkimuksen tavoitteen saavuttamisesta ja mahdollisten jatkotutkimusten suuntaviivat

Tutkimuksessa lienee melko hyvin saatu kartoitetuiksi käytetyn jauhimen toimintamahdollisuudet laitteiston sallimissa rajoissa. On selvitetty suurin piirtein tutkitulla jauhimella saavutettavat käytetyn massan ominaisuuskombinaatiot ja selvitetty ne kriteerit, joilla haluttu ominaisuuskombinaatio voidaan käytetyllä laitteistolla saavuttaa. Jauhatusprosessin hallintamahdollisuuksista on saatu informaatiota. Jauhautumisen laadun hallitseminen näyttää olevan mahdollista ominaiskuormituksen avulla ja tulokset tukevat Brechtin et al. esittämää ominaissärmäkuormitusteoriaa. Jauhatusprosessin täydellinen hallitseminen edellyttäisi kuitenkin myös jauhautumisen kvantitatiivisen puolen hallitsemista. Tutkimuksessa ei tätä puolta saatu selvitettyksi. Jauhautumisen määrällistä kulkua näyttää ominaiskuormituksen lisäksi ohjaavan ainakin jauhimen pyörimisnopeus. Lakeja, joiden mukaan tämä tapahtuu ei tutkimuksen perusteella voitu saada selville. Pyörimisnopeuden vaikutus näyttää riippuvan muista jauhatusoloista, ainakin käytetystä kuormitustasosta. Juuri jauhimen pyörimisnopeuden vai-

kutusta olisi syytä tutkia tarkemmin käyttäen useampia pyörimisnopeuskuormituskombinaatioita. Nimenomaan olisi aiheellista tutkia käytettyjen pyörimisnopeuksien 850 ja 1500 r/min välissä olevia pyörimisnopeuksia, jotka käytännön kannalta lienevät varsin merkittäviä. Aiheellista olisi lisäksi tutkia jauhimen terityksen osuutta jauhatustuloksen määräytymisessä.

Jauhatuksen talouteen vaikuttavia tekijöitä on tutkimuksessa myös selvitetty. Laitteiston sallimista jauhatustavoista on löydetty taloudellisesti edullisin pyrittäessä ominaiskuormitusten 1000 ja 2000 Ws/km määräämään jauhautumisen laatuun. Edellä esitetyt jatkotutkimukset parantaisivat kuitenkin vielä melkoisesti jauhatuksen taloutta säätelevien tekijöiden tuntemusta.

Tutkimuksessa on pyritty esittämään jauhatuksen suunnittelun ja käytännön suorituksen kriteereitä. Suuntaviivat tälle suunnittelulle on esitetty lähinnä tutkittujen jauhatustekijöiden puitteissa, mutta jauhautumisen määrällisen kulun puutteellinen selvittely ei ole sallinut kovin pitkälle menevien suunnitteluohjeiden laatimista.

Yhteenvetona voidaan sanoa, että käytetyn laitteiston aiheuttamien lukuisien rajoitusten puitteissa on tutkimuksen tavoite saavutettu melkoisen hyvin ja lisävalaistusta lienee voitu saada vain jauhatuslaitteiston muutoksilla.

KIRJALLISUUSLUETTELO

1. NISSER, H. von Zwei neue Messkriterien von aufgeschwemmten
Fasern zur Beurteilung der Blattfestigkeit
Svensk Papperstidning 66(1963):2, 37-49
2. GIERTZ, H.W. Ännu ett sätt att se på malningsprocessen
Norsk Skogsindustri 18(1964):7, 239-248
3. WULTSCH, F. von Verfahrenstechnische Aspekte der Mahlung
SCHURZ, J. Das Papier 18(1964):12, 759-765
4. RYTI, N. Paperiteknologia II
TKY, Otaniemi 1966
5. STEENBERG, B. Review of the Effect of mechanical treatment
of fibres
Svensk Papperstidning 66(1963):22, 933-939
6. HIGGINS, H.G. Formation and structure of paper
de YOUNG, J. Vol. 2. Oxford Symposium 1961, British Paper
and Board Makers Ass. (Inc.) 1962, 651-690
7. LEOPOLD, B. Effect of Pulp Processing on Individual Fiber
Strength
TAPPI 49(1966):7, 315-318
8. VAN DEN AKKER Fundamentals of Papermaking Fibers
Cambridge Symposium 1957, British Paper and /y v
Board Makers' Ass. (Inc.) 1961, 435-446

9. HALME, M. Havaintoja virtausilmiöistä kartiojauhinessa
Paperi ja Puu 44(1962):12, 658-660
10. BRECHT, W. von Zur theoretisch-technischen Beurteilung des
SIEWERT, W. Mahlprozesses moderner Mahlmaschinen
Das Papier 20(1966):1, 4-14
11. WEISS, Einsatz und Wirkungsgrad eines modernen
SIEWERT, W. Kegelrefiners
Escher Wyss GmbH:n julkaisu, Ravensburg 1967
12. MÜLLER-RID, W. Beziehungen zwischen Refiner-Garnierung und
WULTSCH, F. Mahleffekt
STARK, H. Atti del Congresso Europeo di tecnica Cartaria,
Venezia 15-19 Settembre 1964, 313-321
13. SYRJÄNEN, A. Jauhinterät ja niiden kuluminen
Paperi ja Puu 47(1965):11, 661-666
14. BRECHT, W. Aspekte zur Zellstoffmahlung im Laboratorium
Atti del Congresso Europeo di tecnica Cartaria,
Venezia, 15-19 Settembre 1964, 107-118
15. HOFFMANN, I. Neue Erkenntnisse bei der Mahlung mit Kegel-
refinern
Deutsche Papierwirtschaft Z.Sonderausgabe 1966,
43-46
16. TOLVI, E. Hollanteri- ja kartiomyllyjauhatus
Paperi ja Puu 33B(1951):1, 27-32
:5, 169-174
:11, 338-342

17. WULTSCH, F
AFLENZER, F.
Vergleichende Untersuchungen an kontinuierlich
und diskontinuierlich arbeitenden Stoffaufbe-
reitungs- und Stoffmahlungssystemen
Schriften des Vereins der Zellstoff- und
Papier-Chemiker und -Ingenieure, Band 25,
Darmstadt 1953, 13-15
18. CASKEY, F.E.
Strength development through stock refining
as influenced by certain variables
TAPPI 37(1954):4, 156-162
19. MAYNARD, C.R.G.
Some Experiments with conical refiners
The Worlds Paper Trade Review 135(1951):17,
1225-1240
20. ARJAS, A.
Jauhimen läpi virtaavan paperimassan viipymis-
aikajakautuman vaikutus jauhatustulokseen
Lisensiaattityö, TKK 1967
21. SMITH, S.
The Action of the Beater
The technical Section of the Paper Makers'
Association of Great Britain and Ireland,
London 1923
22. HALME, M.
How to use Formulae to Study Refining Equipment
Paper Trade J. 140(1964):45, 33-35
23. STIPHOUT, J.M.J. van
A Preliminary Study of Refining Action on
cellulose Fibres
TAPPI 47(1964):2, 189-191A

24. DALZELL, D.R.

A comparison of paper Mill Refining Equipment
TAPPI 44(1961):4, 241-244

25. WULTSCH, F.

Der Escher-Wyss Kleinrefiner als Standard-
Prüfgerät für moderne Stoffaufbereitungs-
anlagen

Das Papier 12(1958):13/14, 334-342

26. BRECHT, W. von

Technologischer Wirkungsvergleich von messer-
garnierten Mahlmaschinen Unterschiedlicher
Bauart

Das Papier 20(1966):6, 301-311

Typskulptur
LINTEN ISANIK

LIITTEIDEN SISÄLLYSLUETTELO

Liitesivu

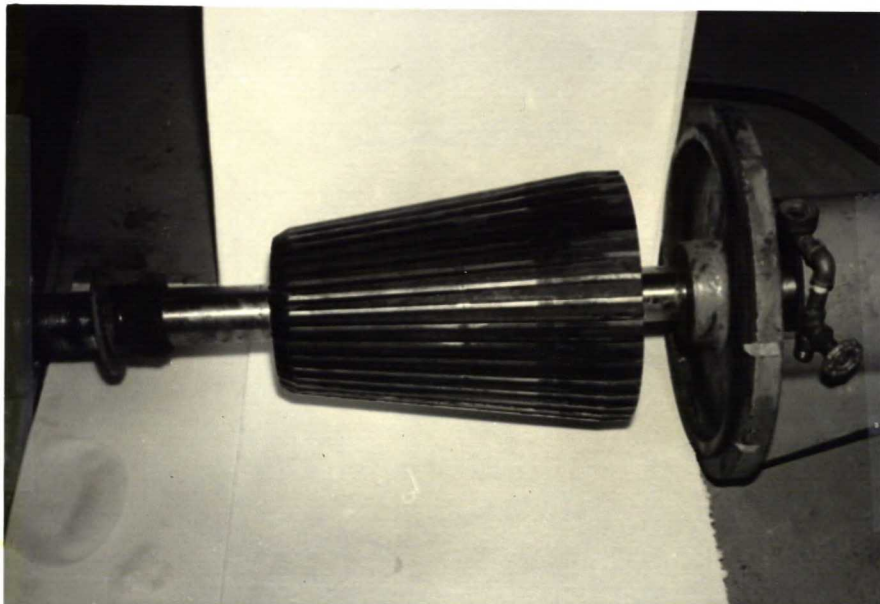
Valokuvia jauhimesta ja jauhatusasemasta	1
Sähkömoottorin akseliteho vs. verkosta ottama teho	3
Koetulokset graafisesti esitettyinä	4
- Kokonaishäviöteho ja sulpun kierrätykseen	
kuluva teho vs. pyörimisnopeus	4
- Toistettavuustutkimukset	6
- Ominaissärmäkuormituksen vaikutus jauhatustulokseen	10
- Pyörimisnopeuden vaikutus jauhatustulokseen tietyllä	
ominaissärmäkuormituksella	22
- Jauhatussakeuden vaikutus jauhatustulokseen	34
- Tilavuusvirtauksen vaikutus jauhatustulokseen	43
- SR-luku puhtaan ominaisenergian ja repäisypinta	
katkeamispituuden funktiona eräissä jauhatuksissa	52
- Eri ominaissärmäkuormituksilla saavutetut repäisypinta-	
katkeamispituuskombinaatiot	53
- Tehonoton rakenne ja tehohyötysuhteet eri jauhatuksissa	54
- Eräät sulpun ja aarkin ominaisuudet vs. kokonaisominais-	
energia eräissä jauhatuksissa	55
Häviöteho ja sen koostumus	58
Tulostaulukot	60
- Toistettavuustutkimukset	60
- Varsinaiset jauhatukset	65
- Taloudellisuustaulukko	76

Tehonmittaus Monax 2 mitta-arvon muuttajalla	77
Kiertovesiarkkimuotti	80
Potentiaalisen kutistuman määrittäminen	81
Lämpötilan nousu jauhatuksessa	82
Satunnaiset virhelähteet	83

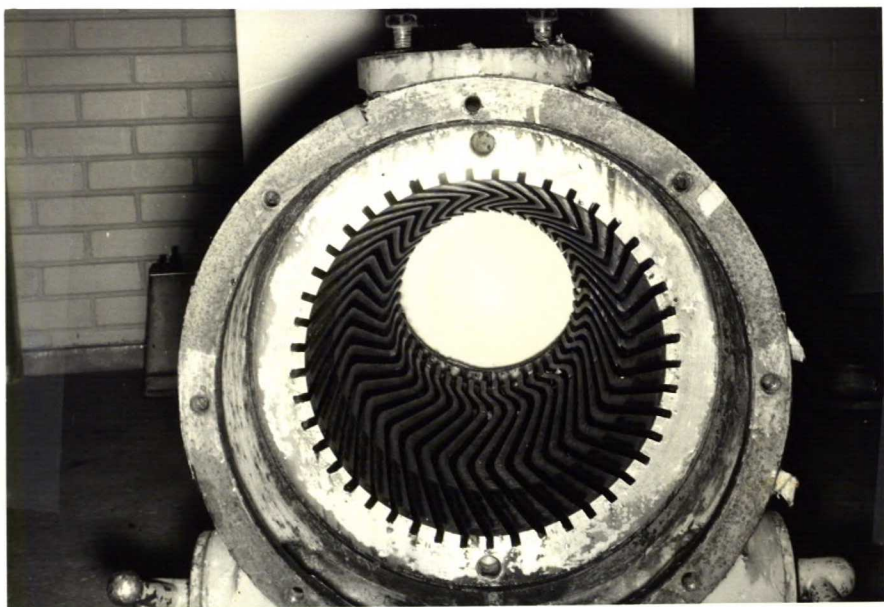
P. J. Järvelä

LIITE N:o 1

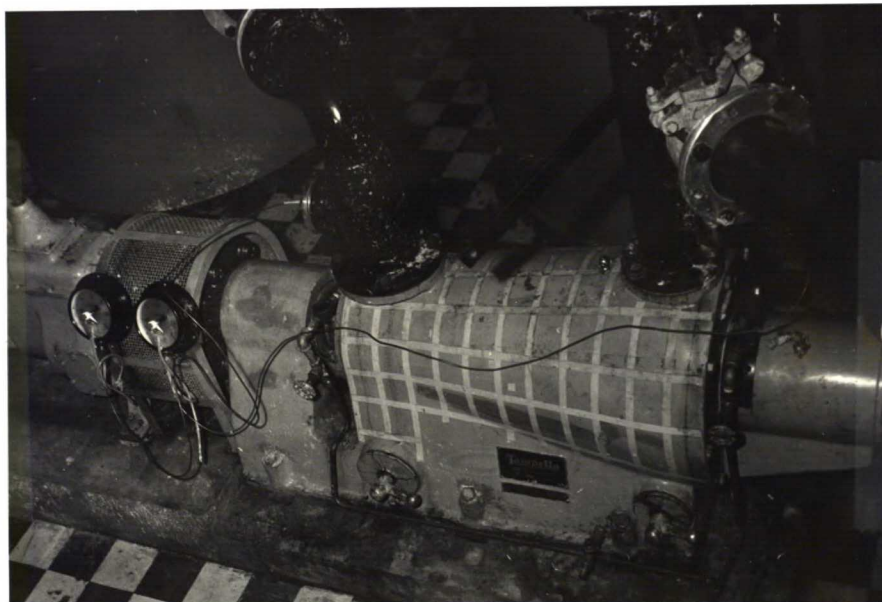
Valokuvia jauhimesta ja jauhatusasemasta



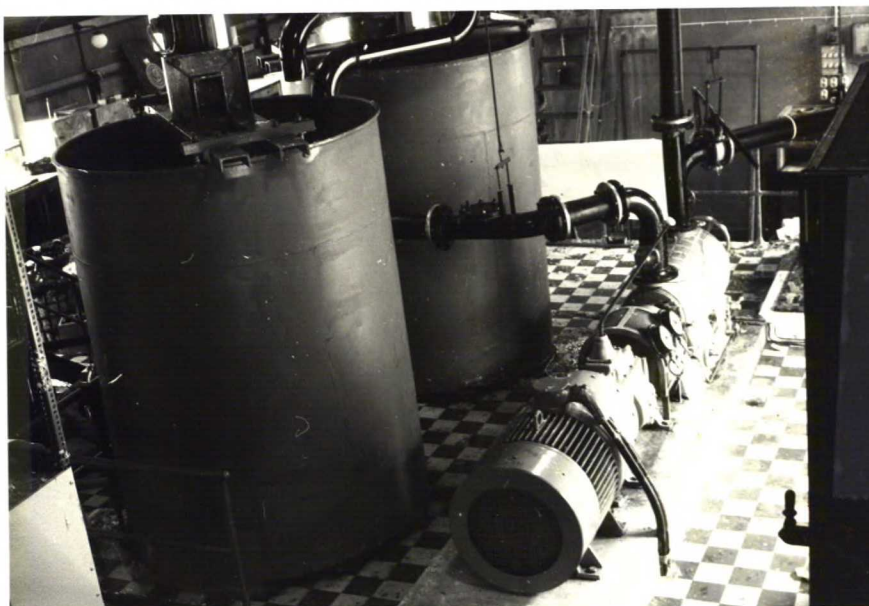
Hydrafiner 00A:n roottori



Hydrafiner 00A:n staattori

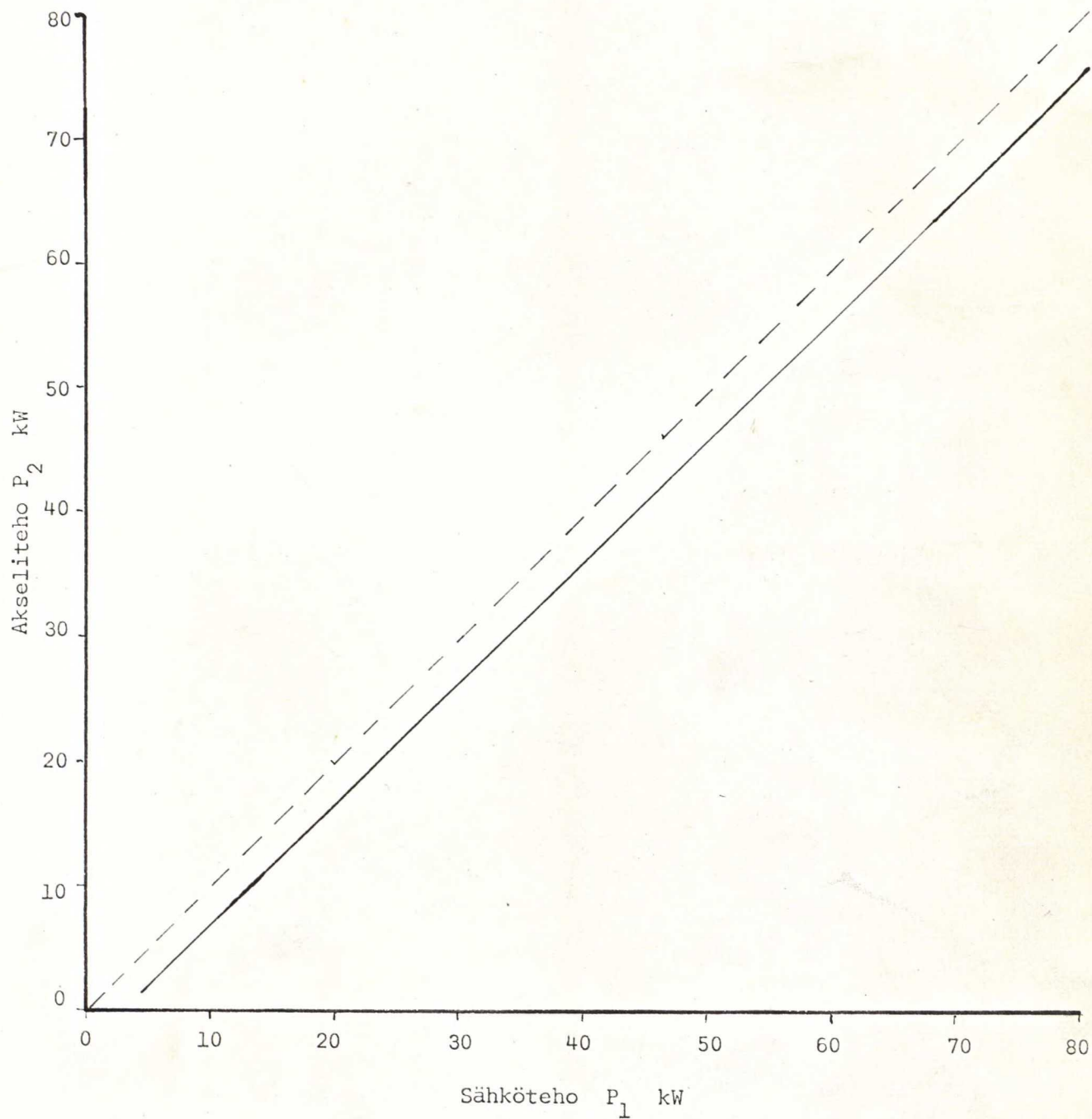


Hydrafiner 00A

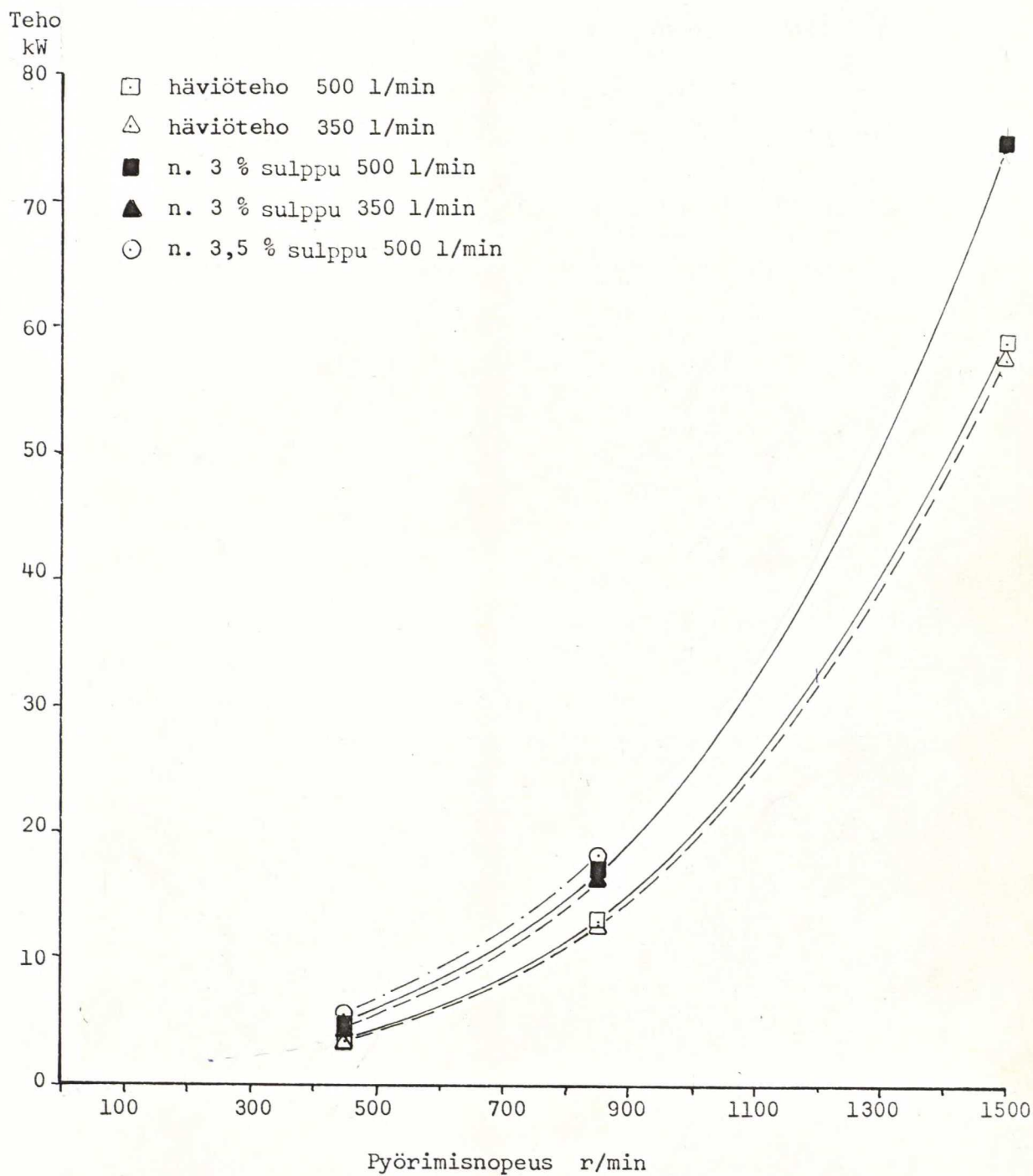


Jauhatusasema

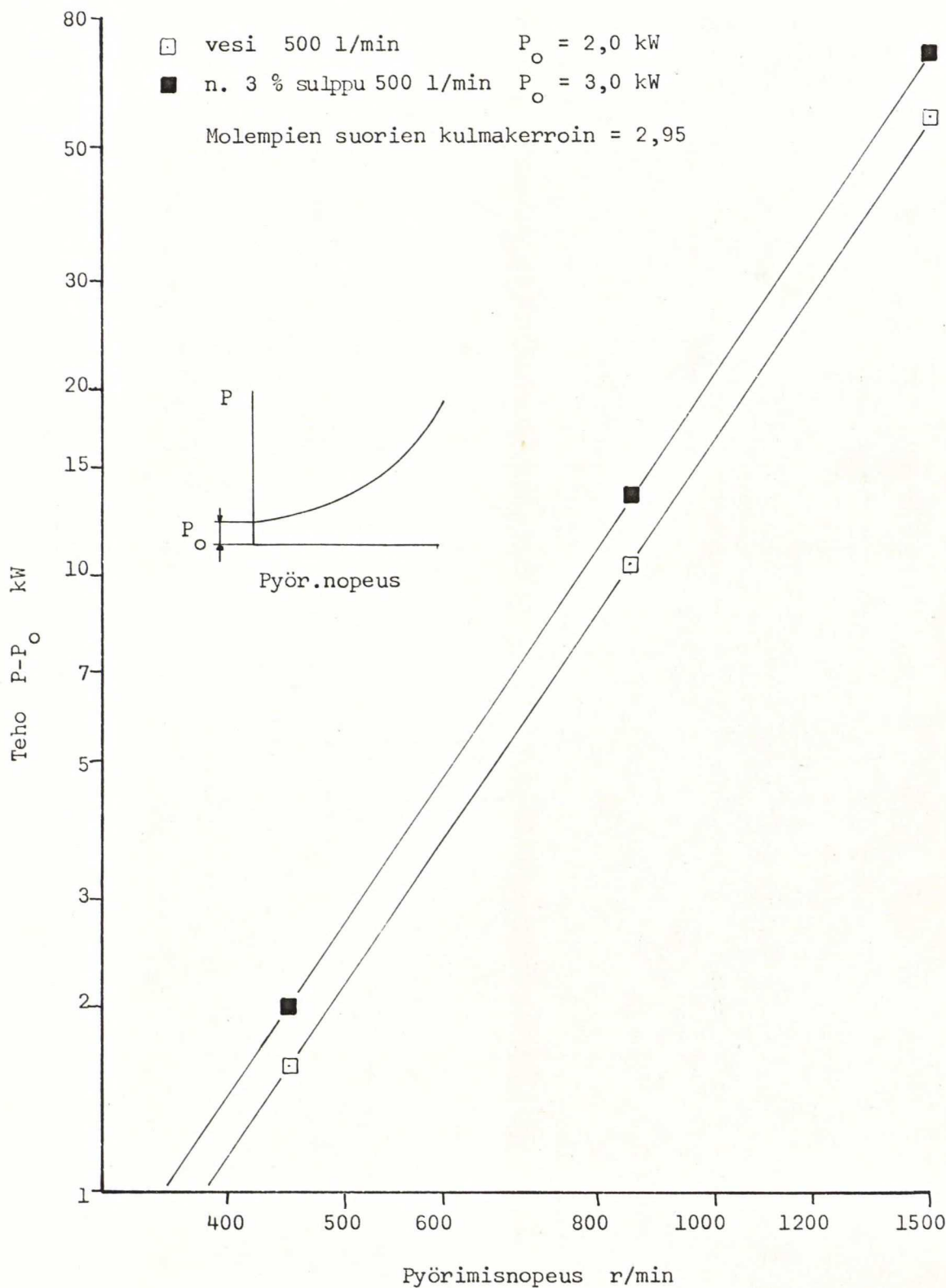
Käytetyn sähkömoottorin akseliteho sen verkosta
ottaman tehon funktiona



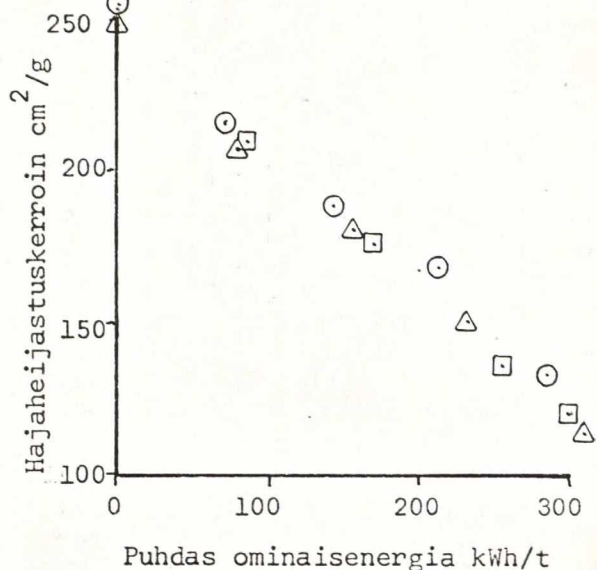
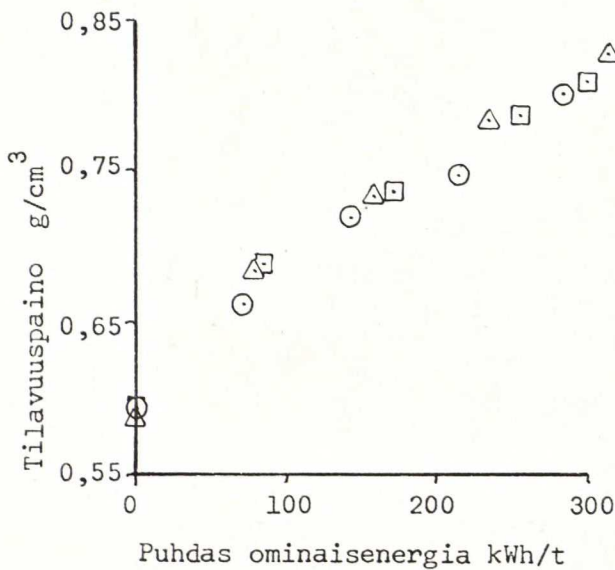
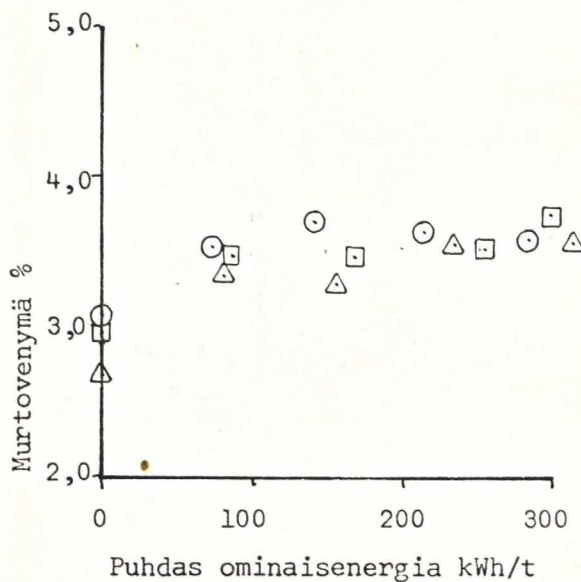
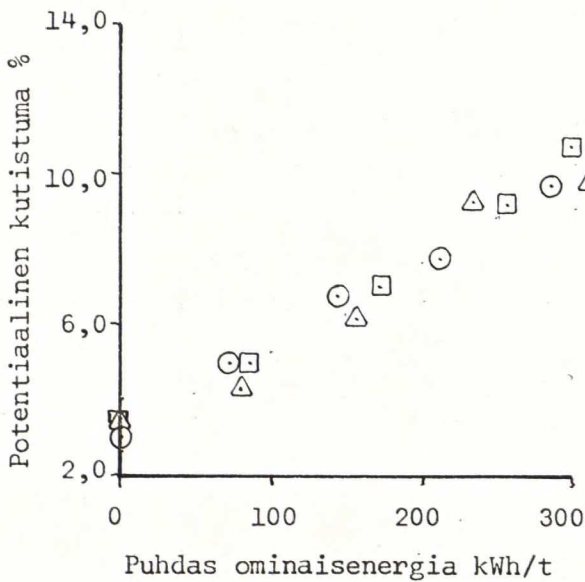
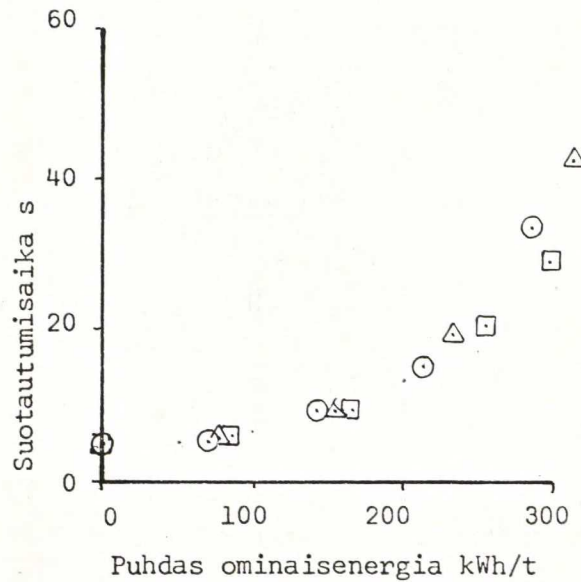
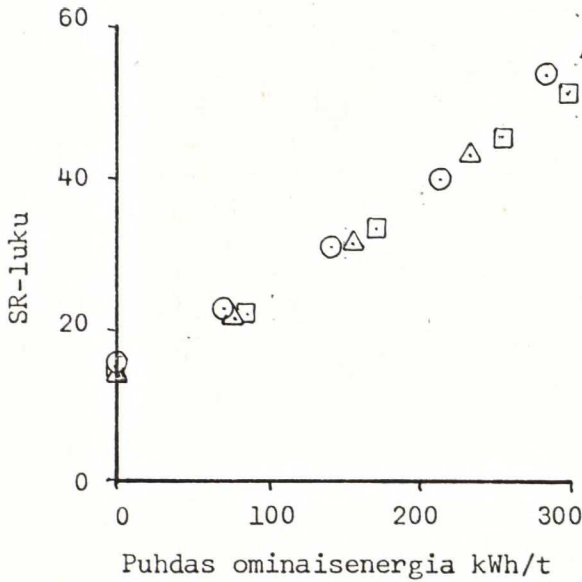
Kokonaishäviöteho ja sulppun kierrätykseen kuluva teho
pyörimisnopeuden funktiona

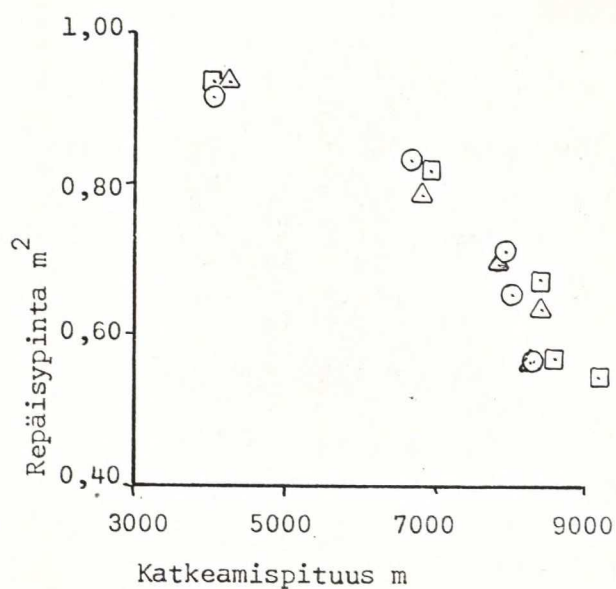
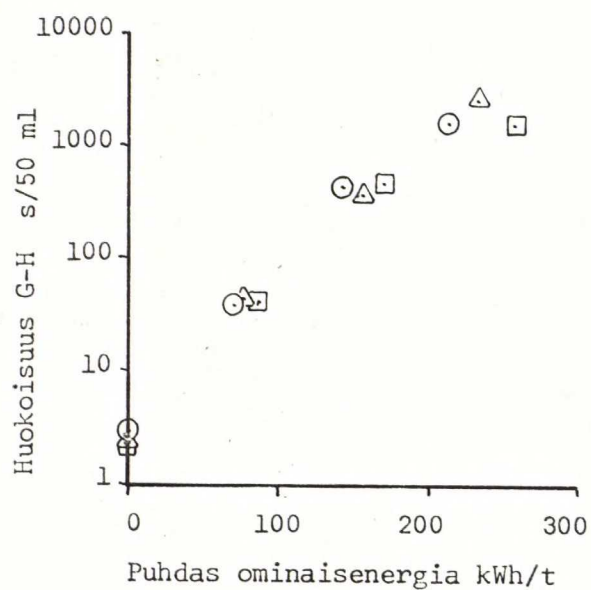
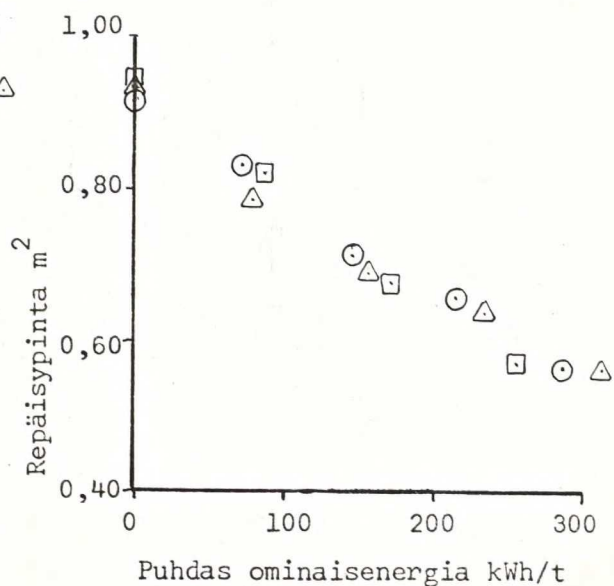
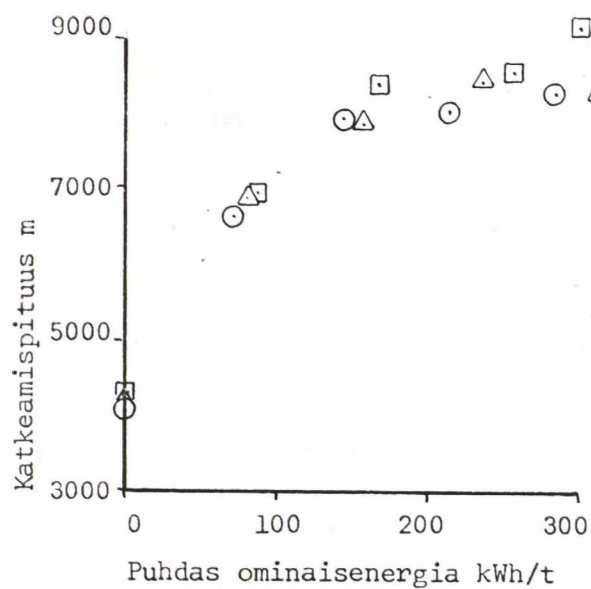


Häviötehon ja sulpun kierrätykseen kuluvan tehon ja pyörimisnopeuden välinen riippuvuus logaritmisella asteikolla esitettynä



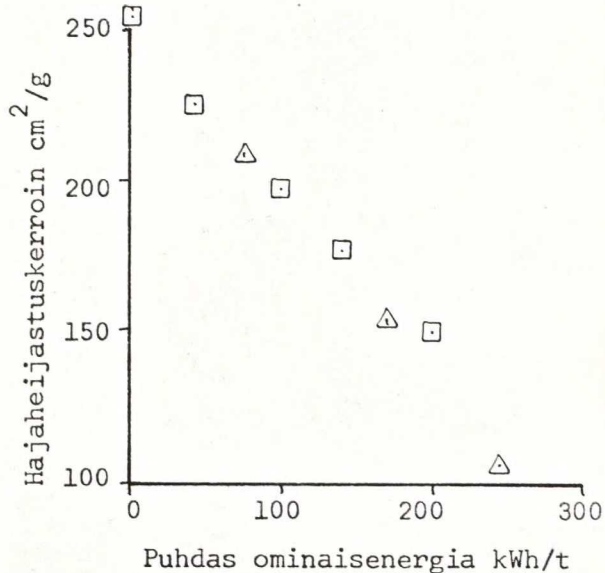
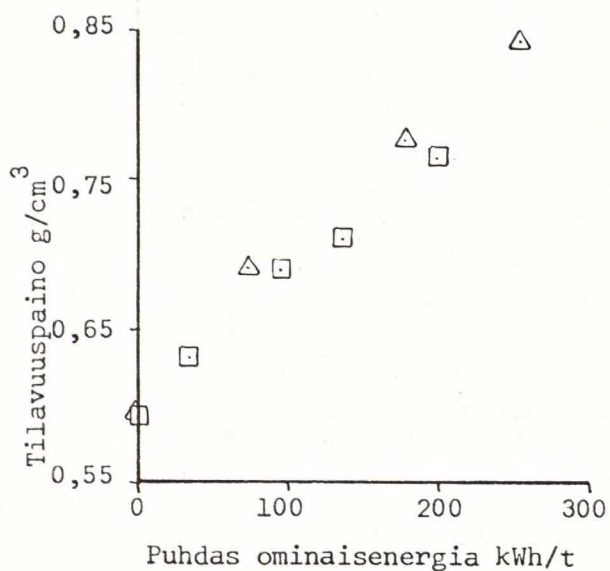
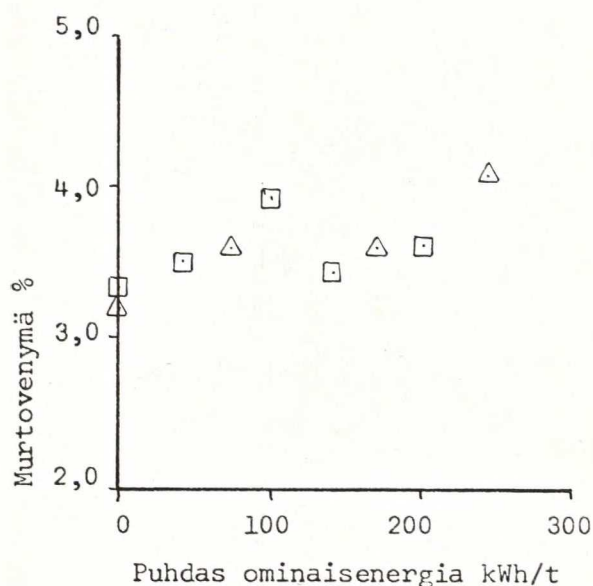
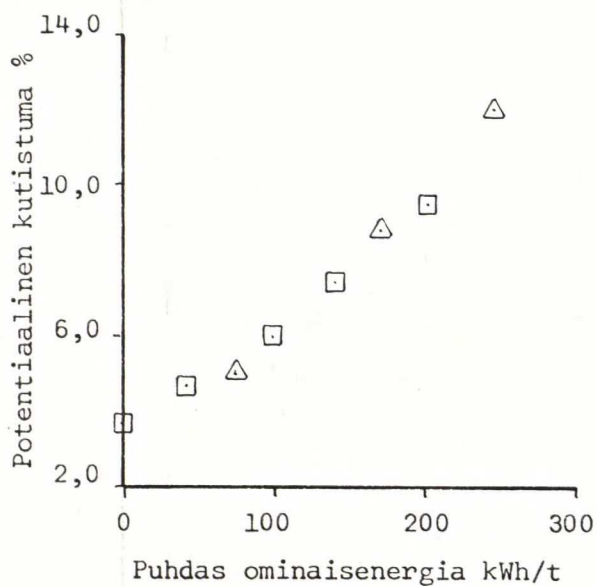
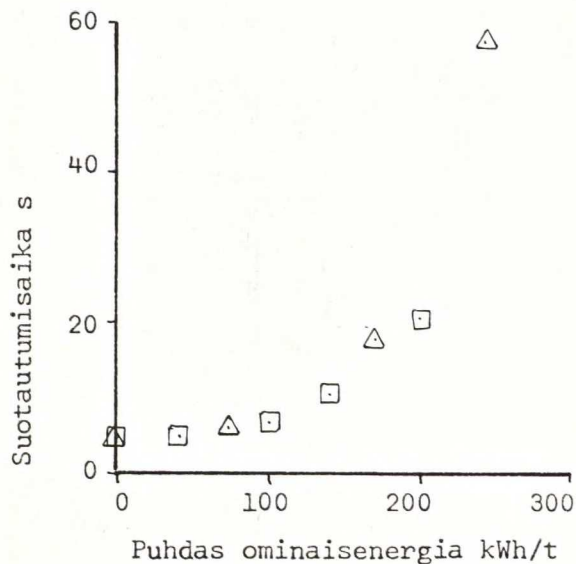
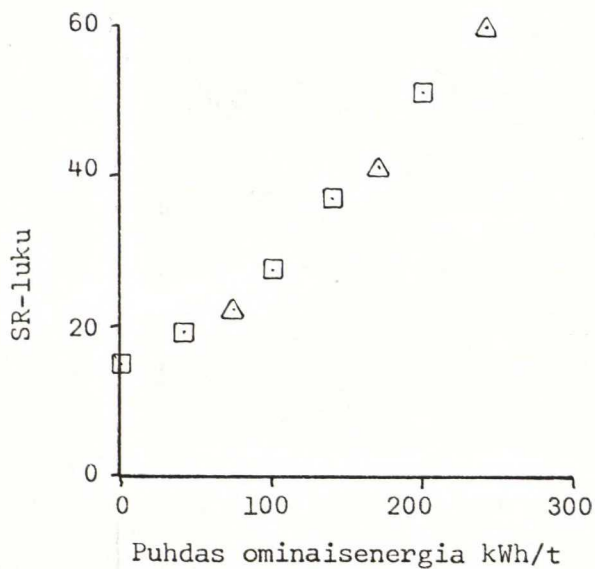
- Jauhatus 1. 1880 Ws/km 850 r/min 2,9 % 300 l/min
 △ Jauhatus 2. 2020 Ws/km 850 r/min 2,9 % 300 l/min
 □ Jauhatus 3. 2040 Ws/km 850 r/min 2,6 % 300 l/min

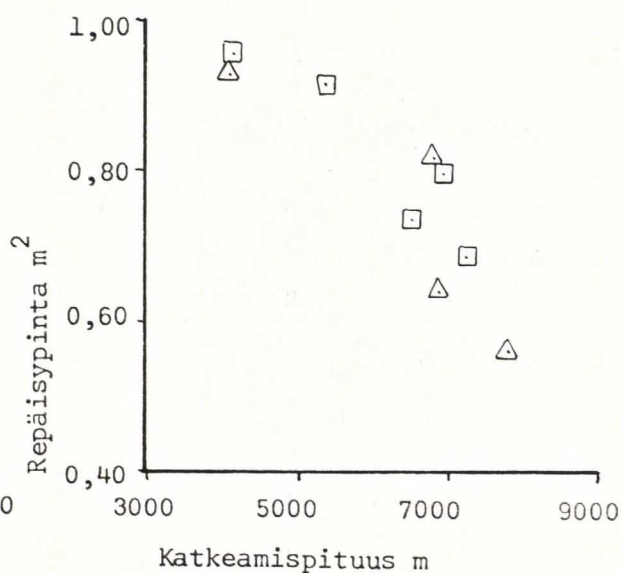
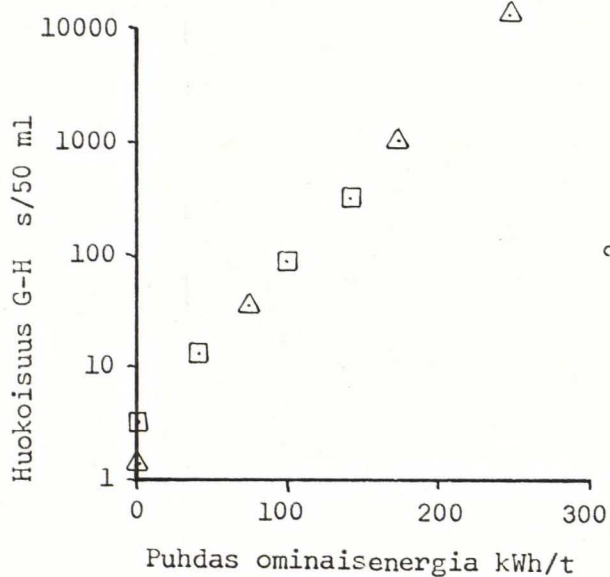
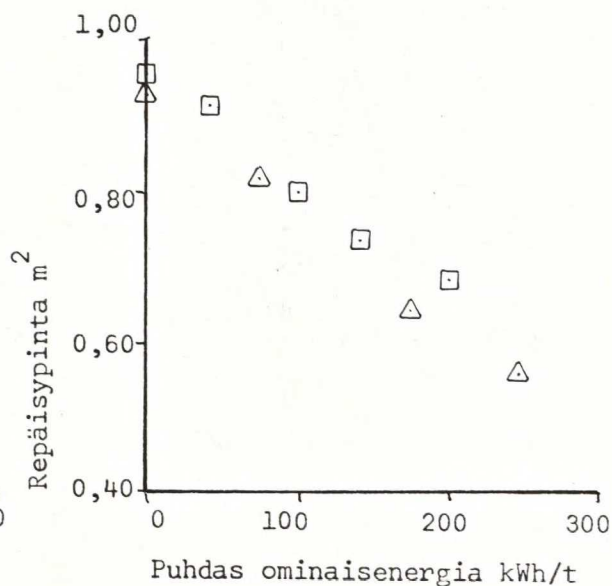
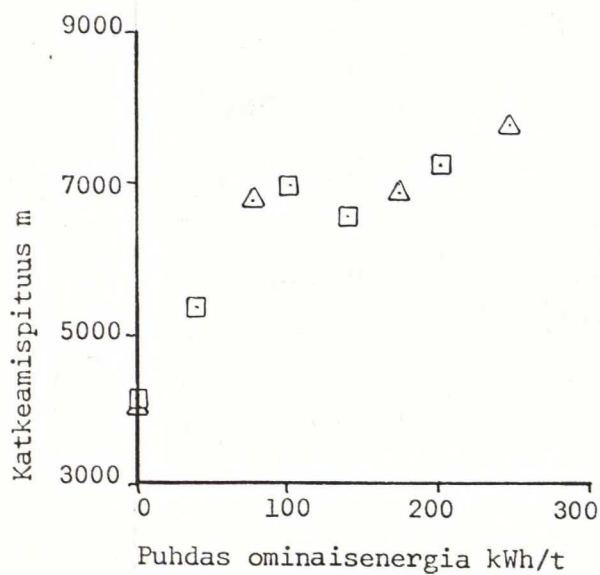




Toistettavuustutkimukset

- △ Jauhatus 4. 2020 Ws/km 850 r/min 2,7 % 500 l/min
 □ Jauhatus 5. 1980 Ws/km 850 r/min 3,3 % 500 l/min

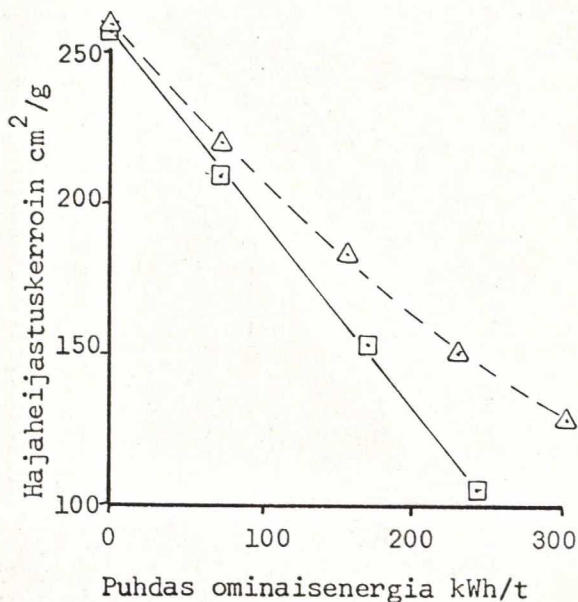
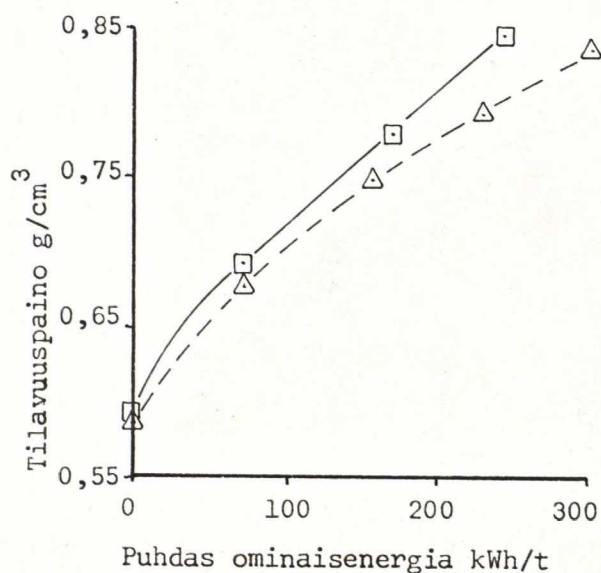
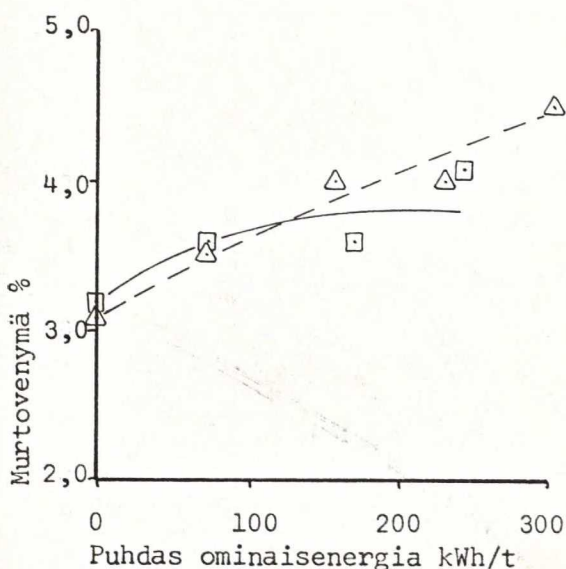
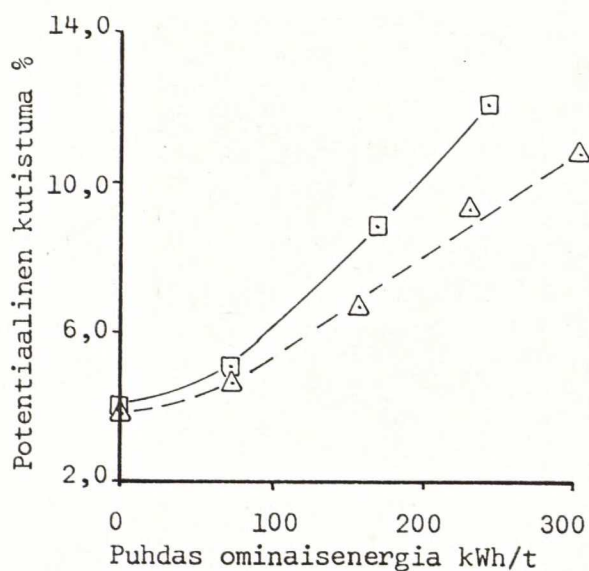
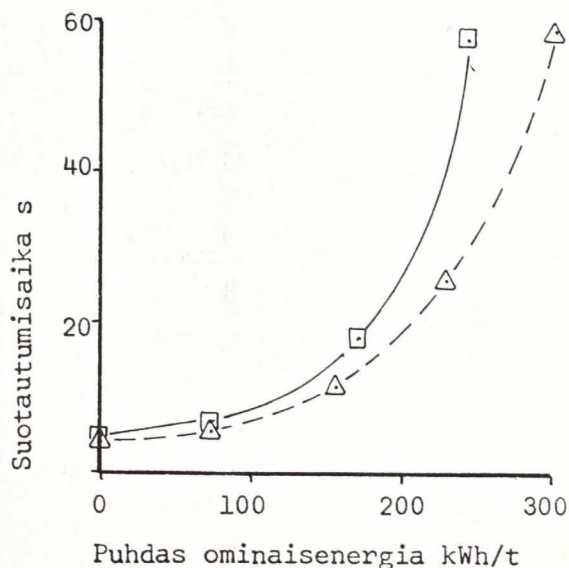
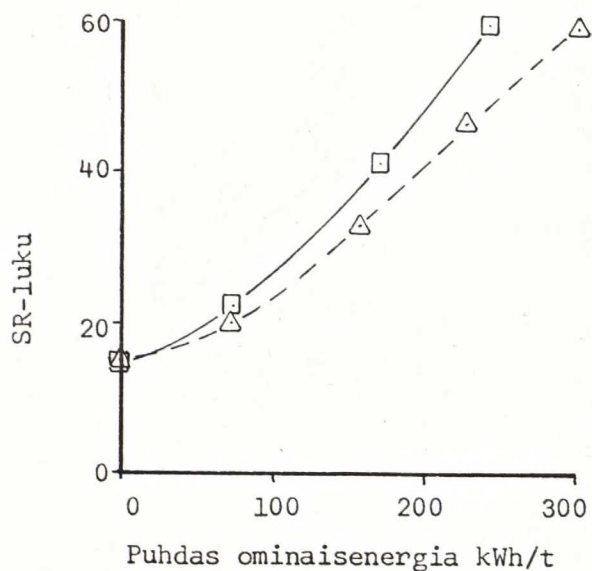


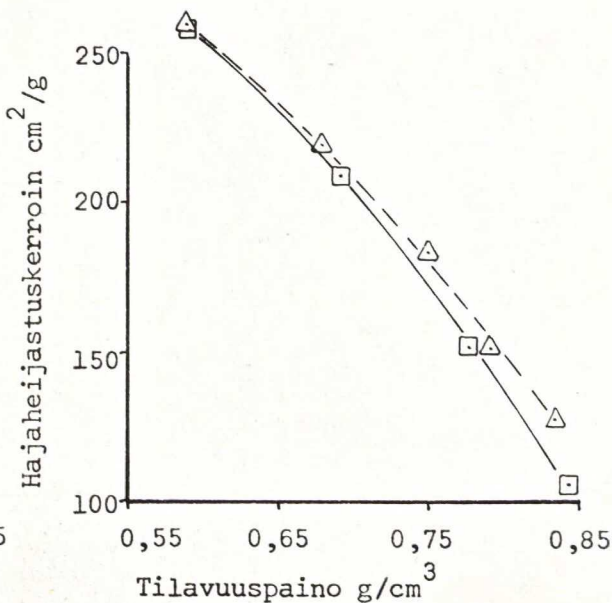
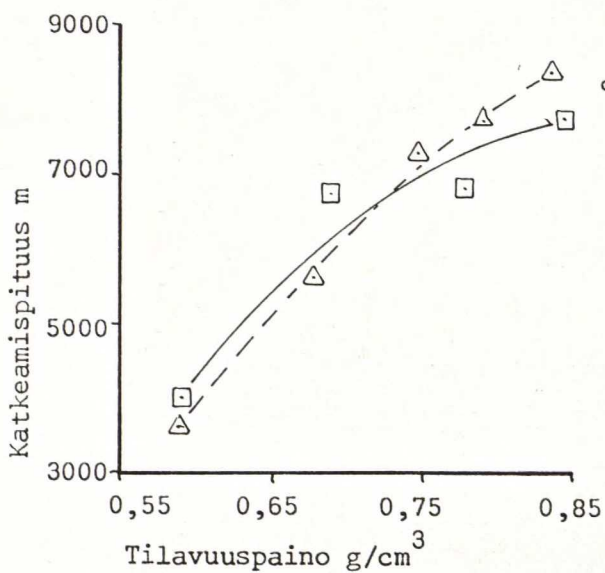
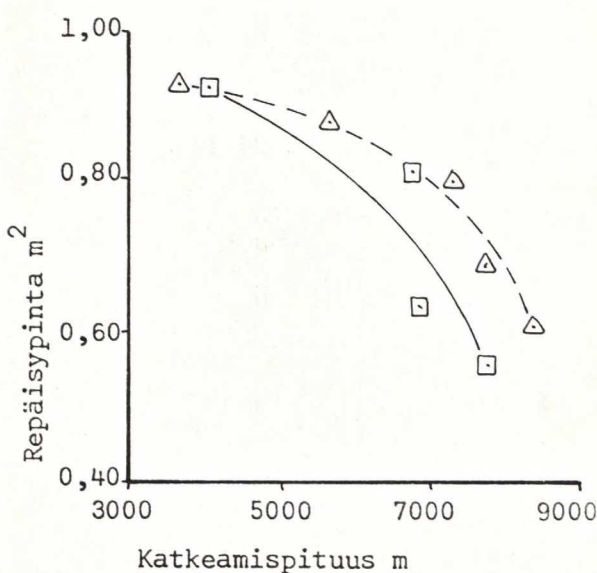
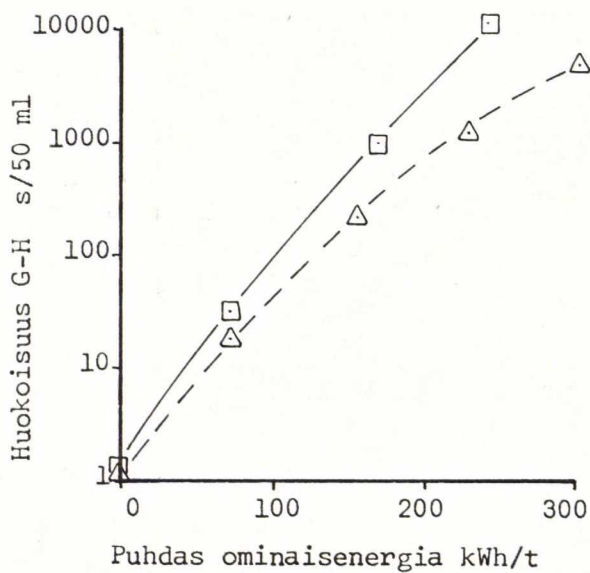
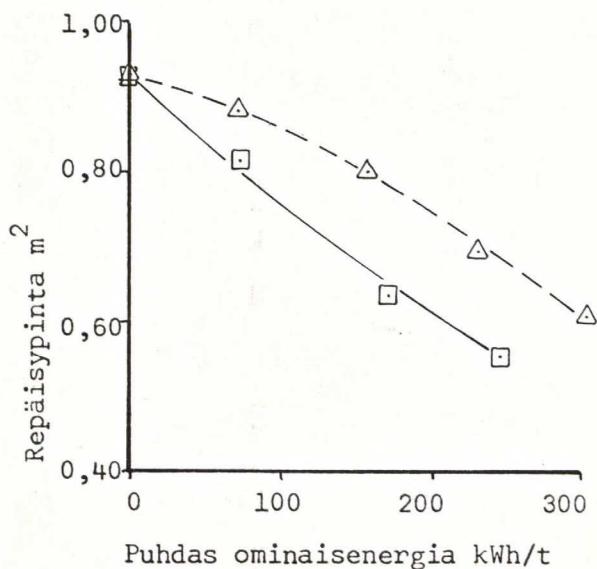
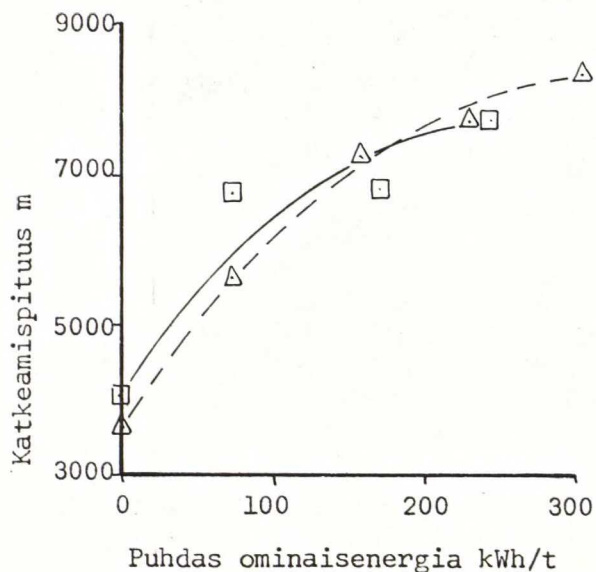


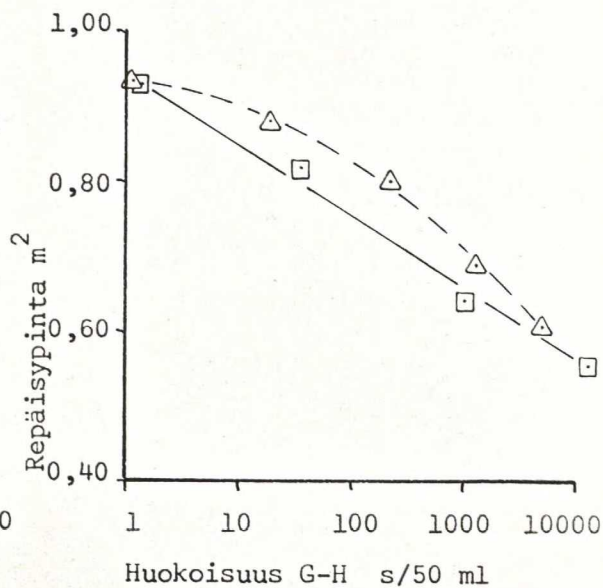
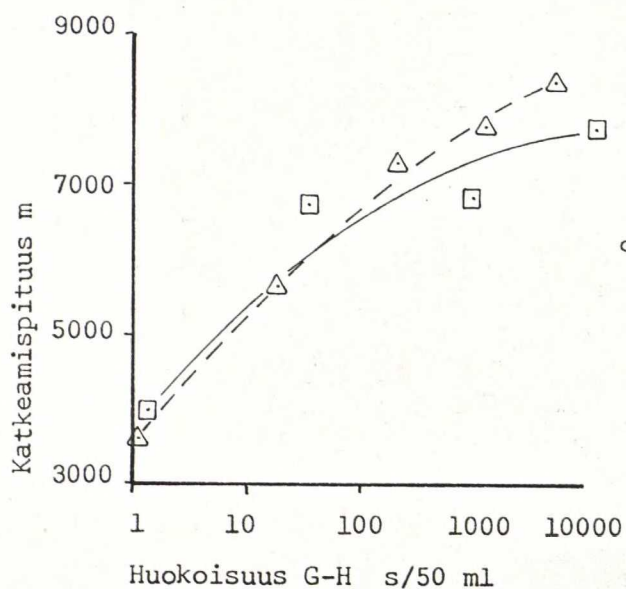
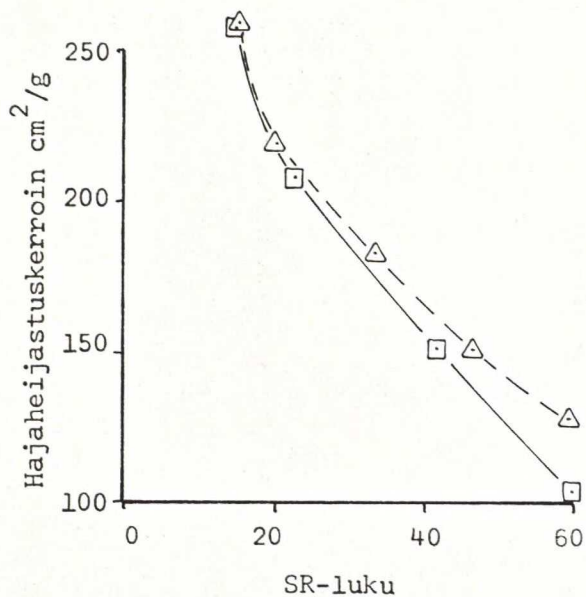
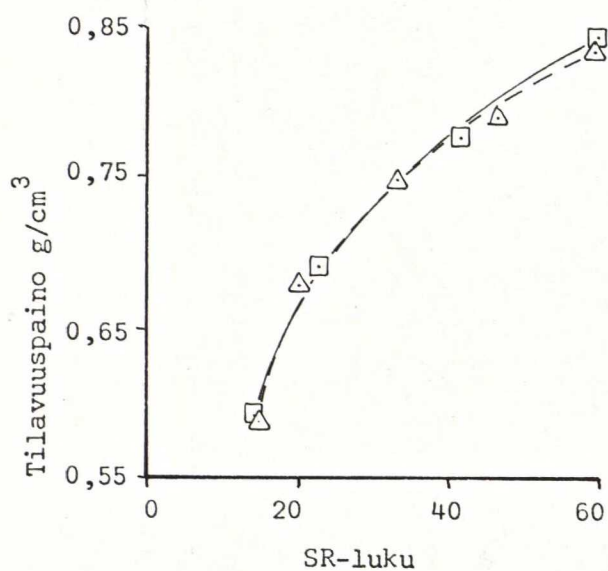
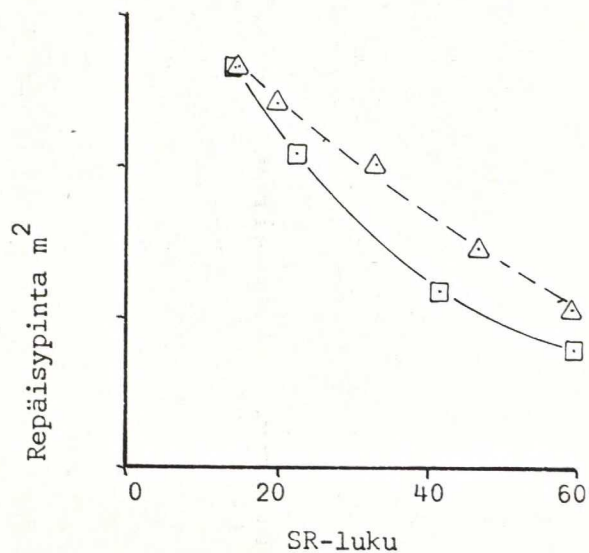
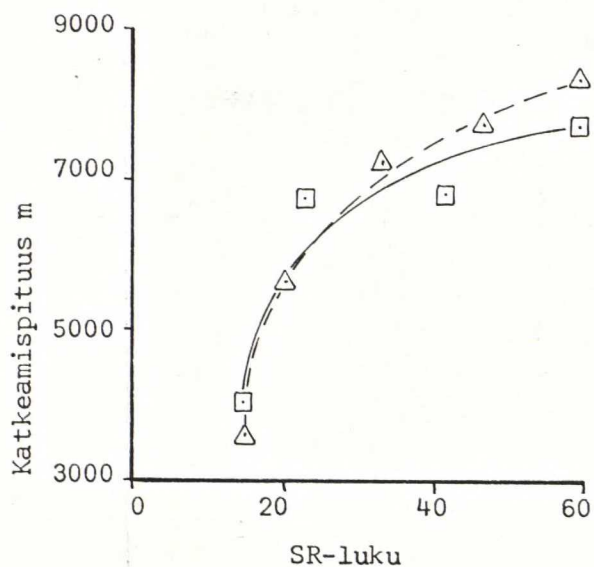
Ominaisrämmäkuormituksen muutos

△ Koepiste 2. 1050 Ws/km 850 r/min 2,8 % 500 l/min

□ Koepiste 3. 2020 Ws/km 850 r/min 2,7 % 500 l/min



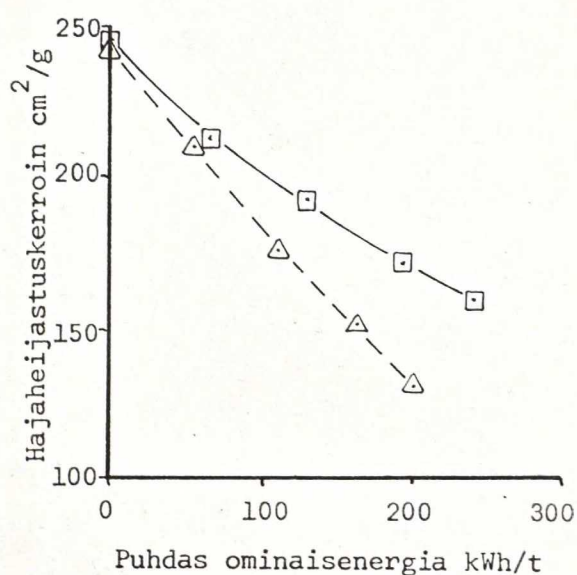
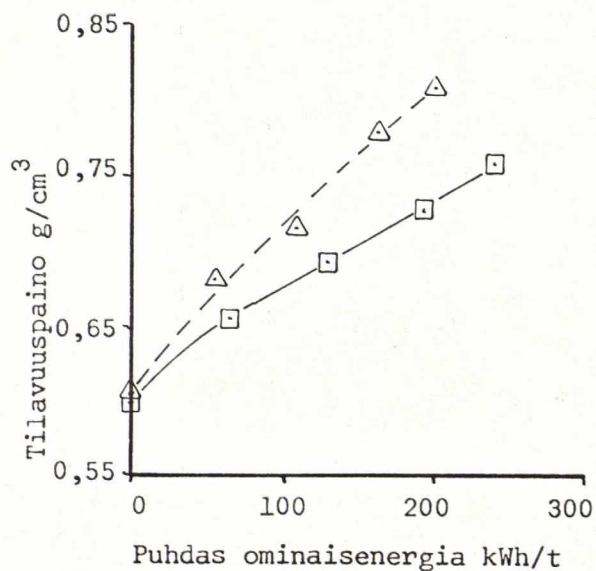
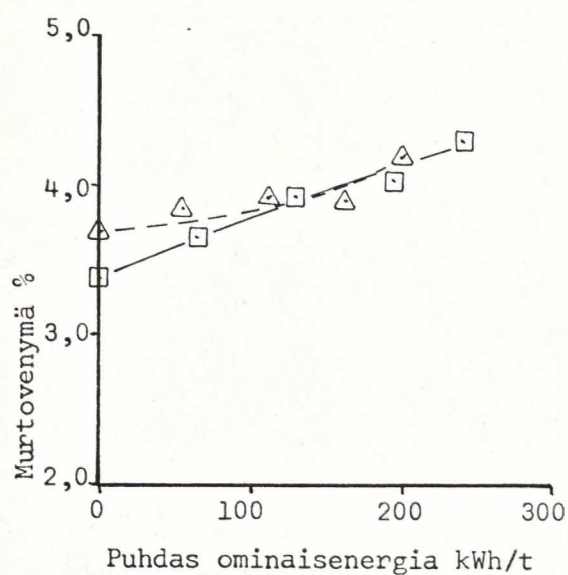
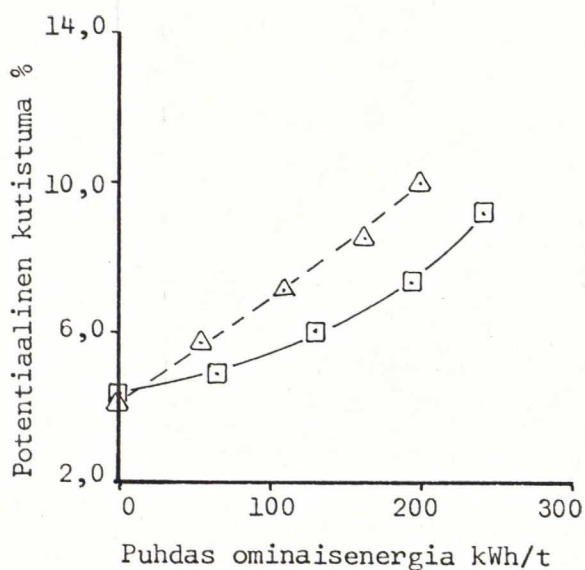
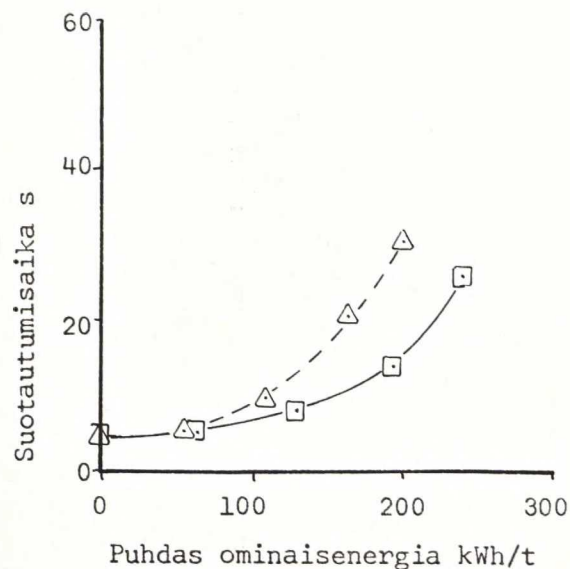
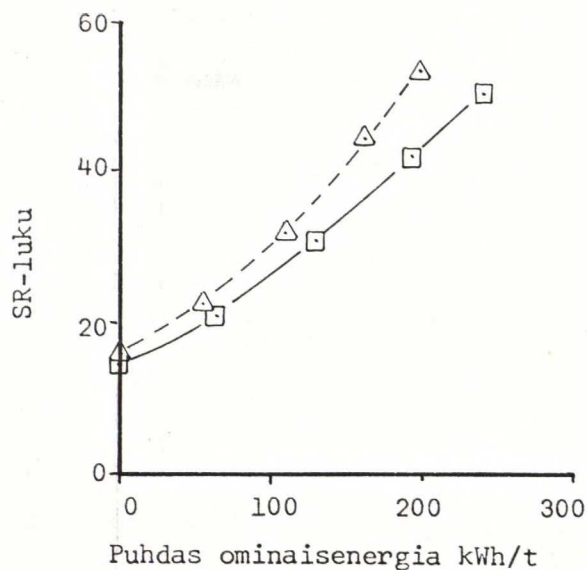


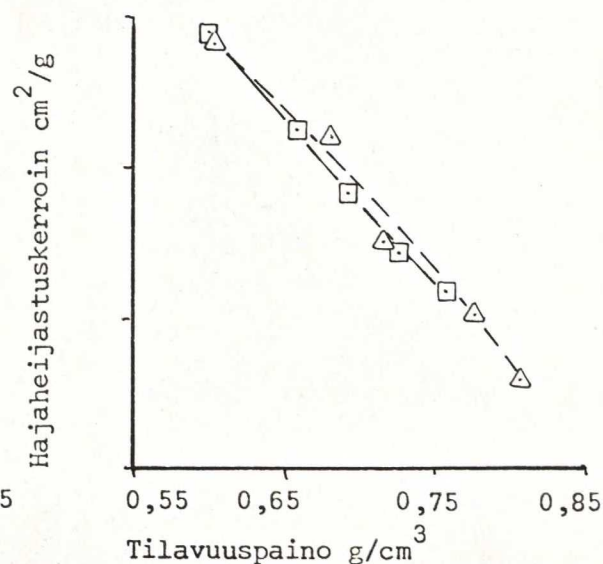
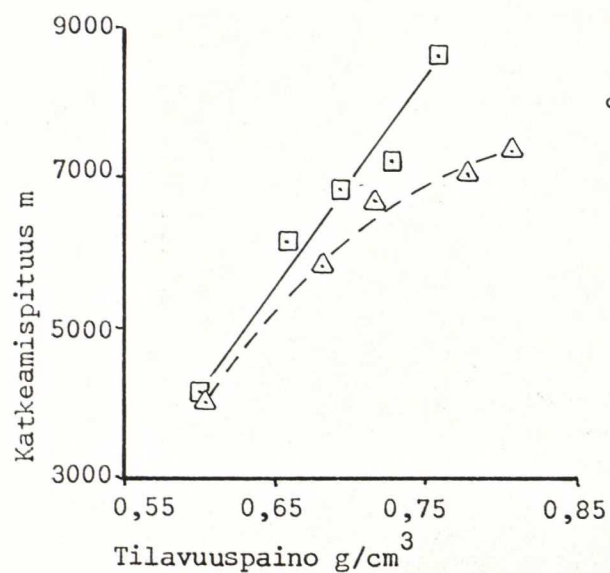
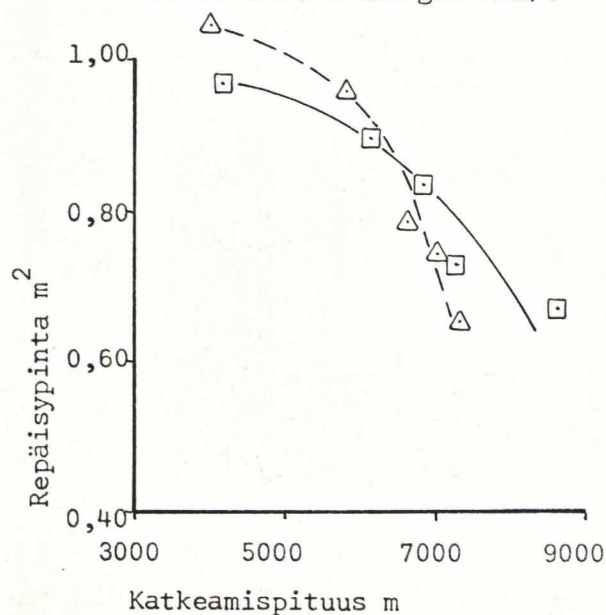
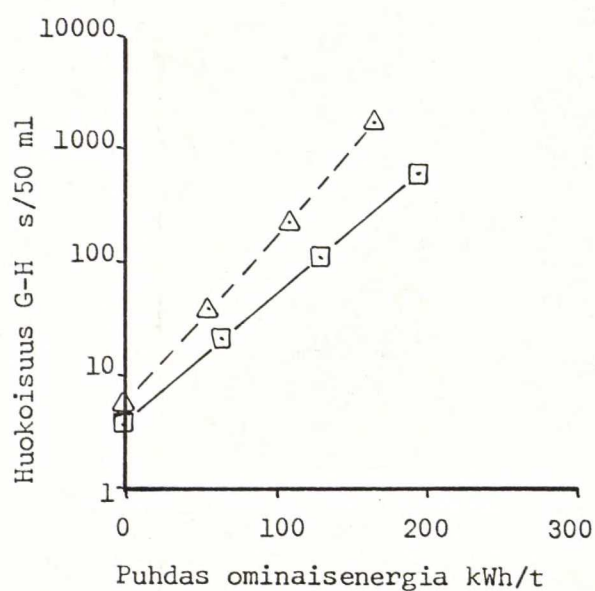
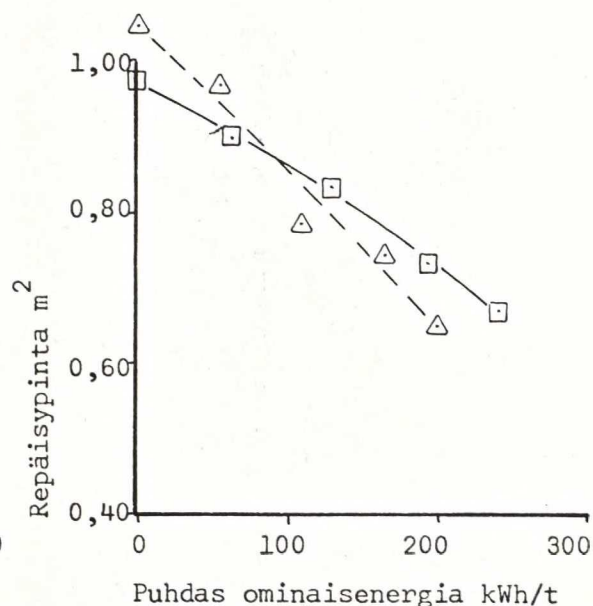
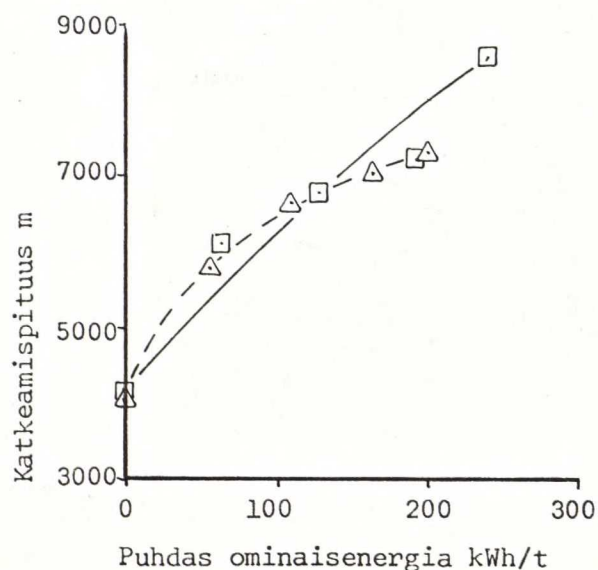


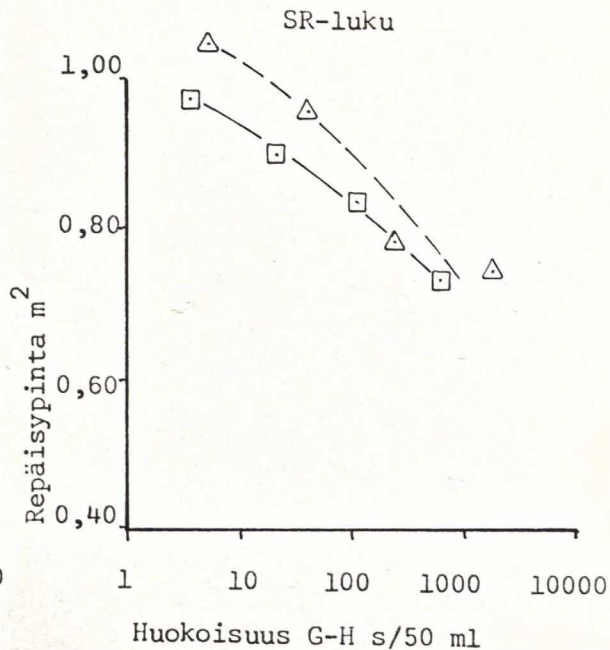
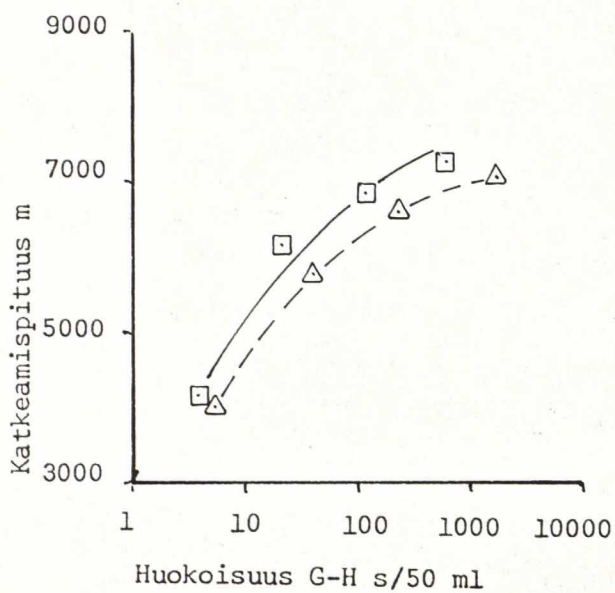
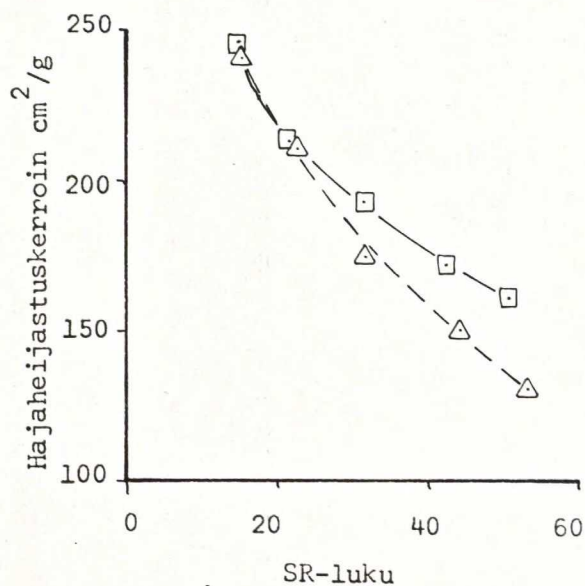
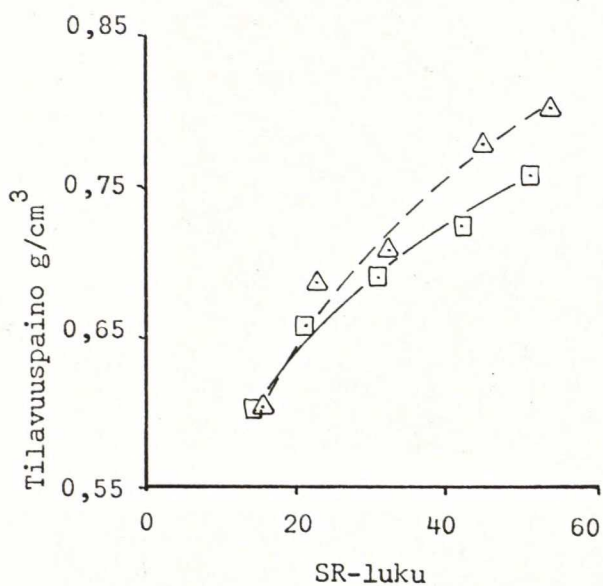
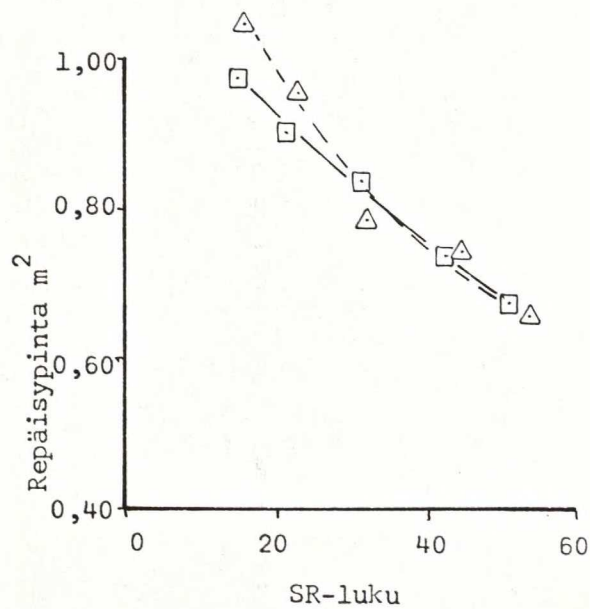
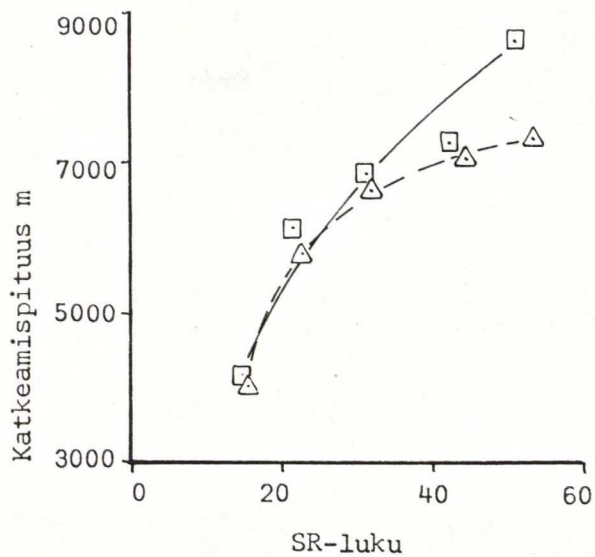
Ominaisrämmäkuormituksen muutos

□ Koepiste 6. 1040 Ws/km 850 r/min 3,6 % 500 l/min

△ Koepiste 7. 2010 Ws/km 850 r/min 3,6 % 500 l/min



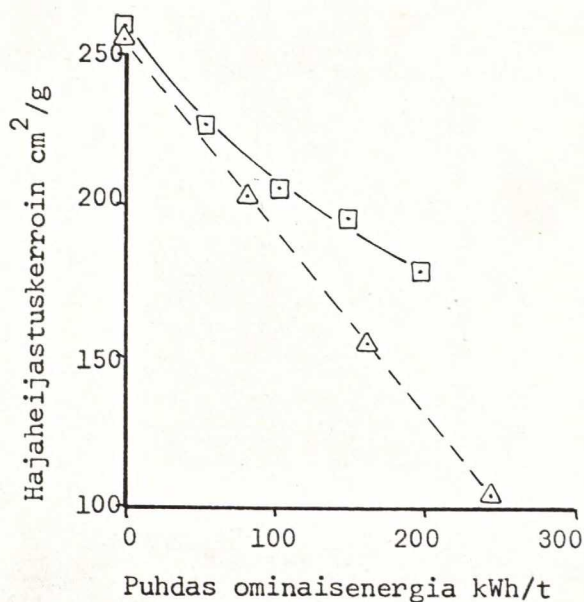
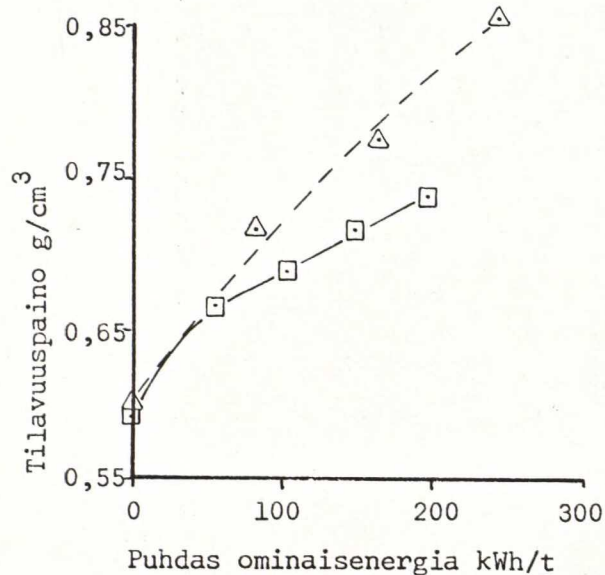
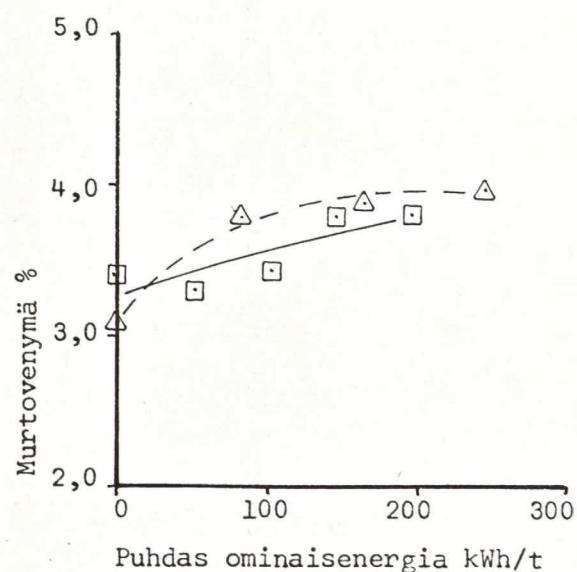
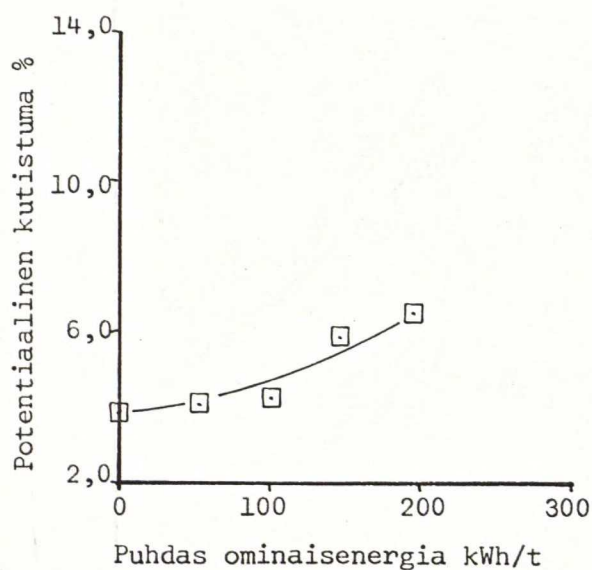
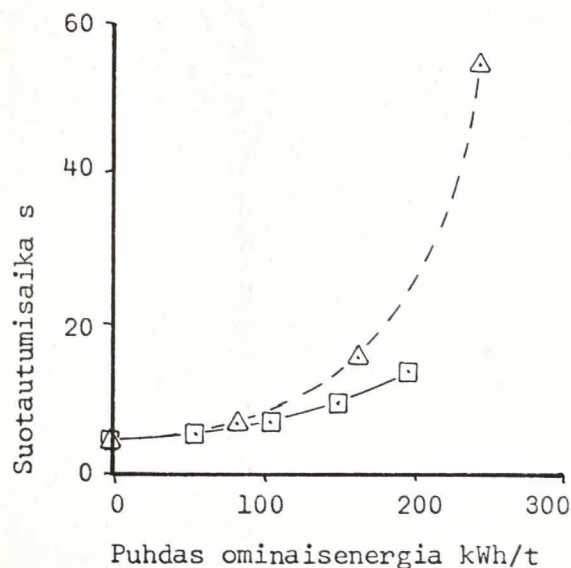
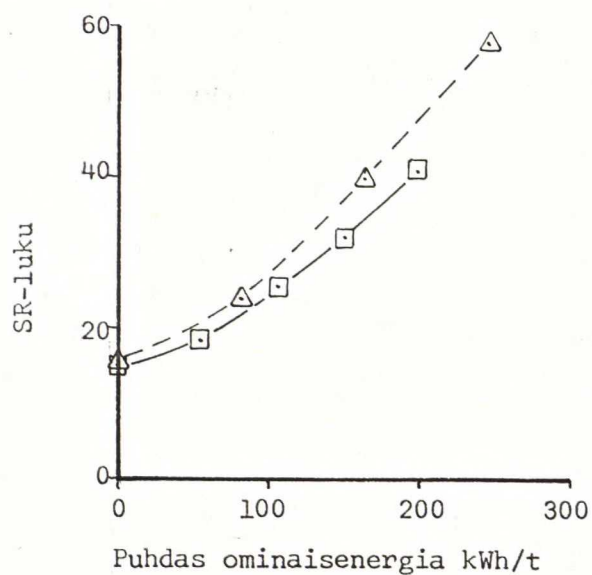


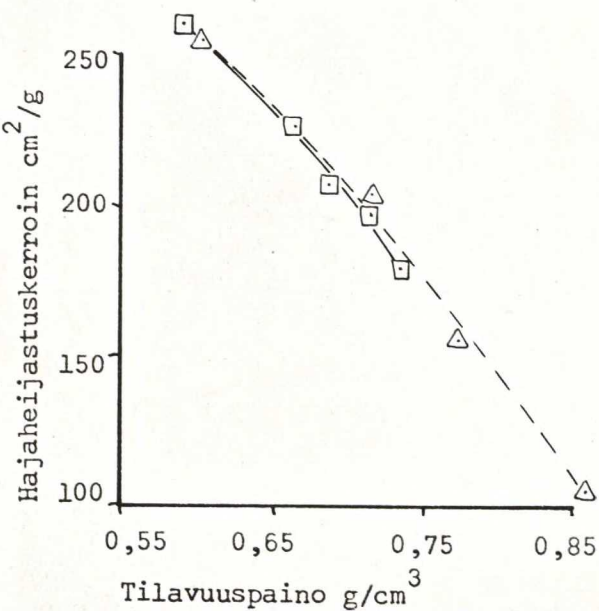
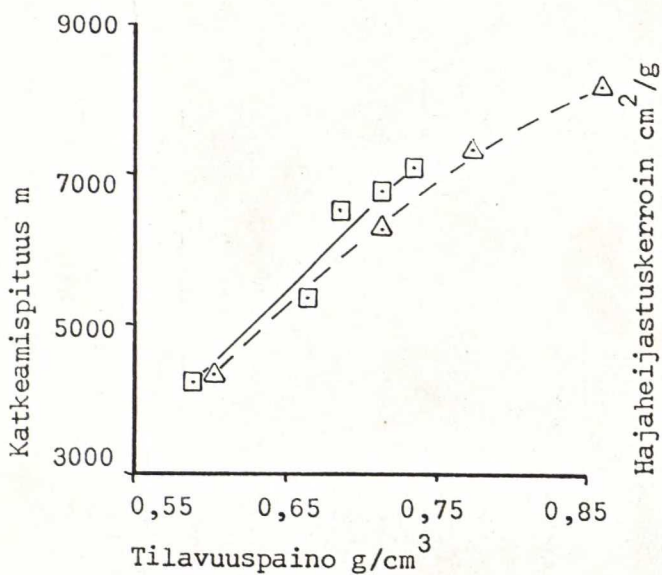
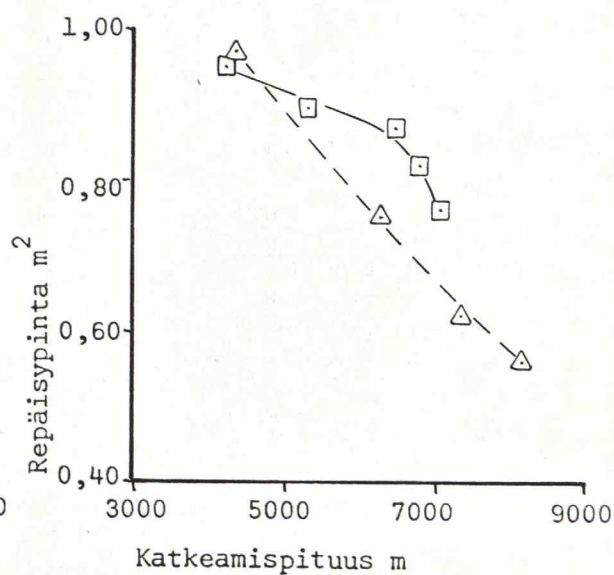
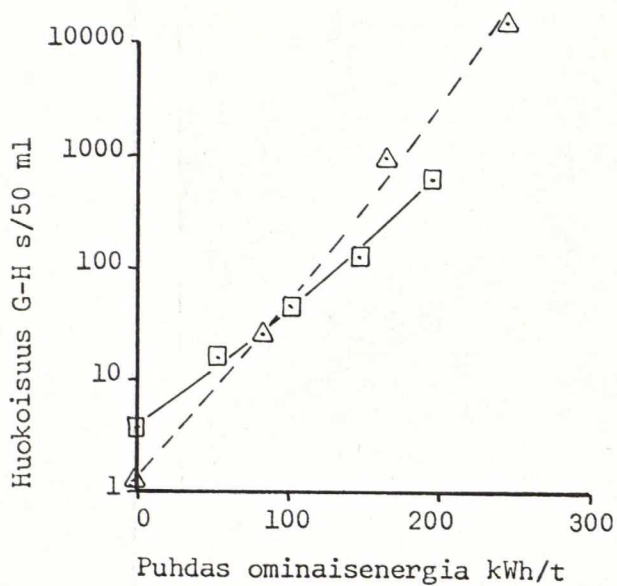
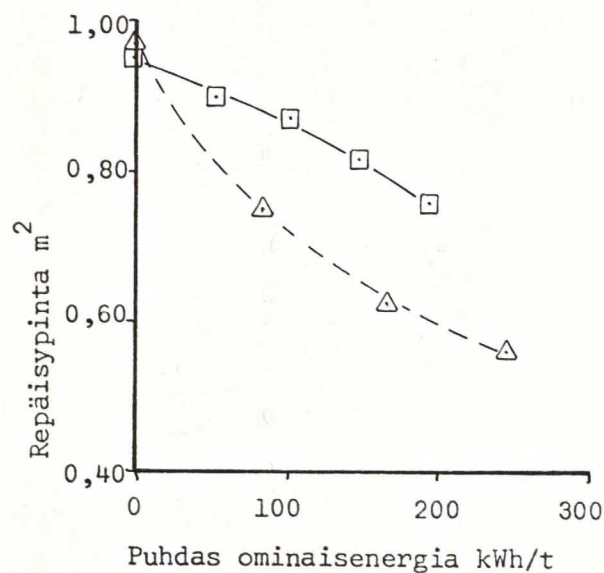
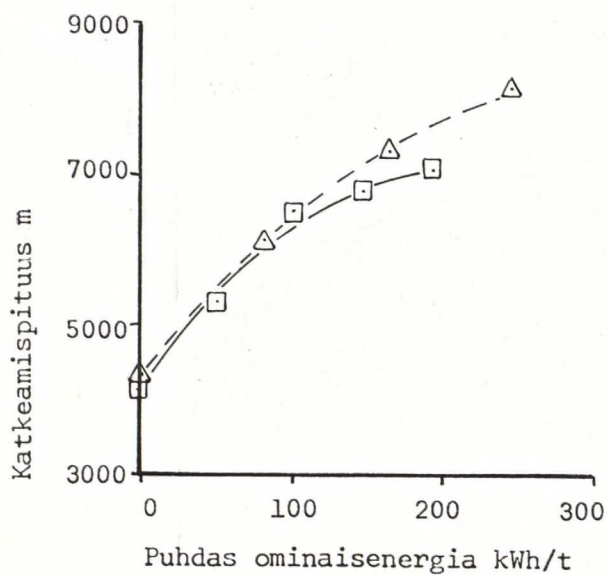


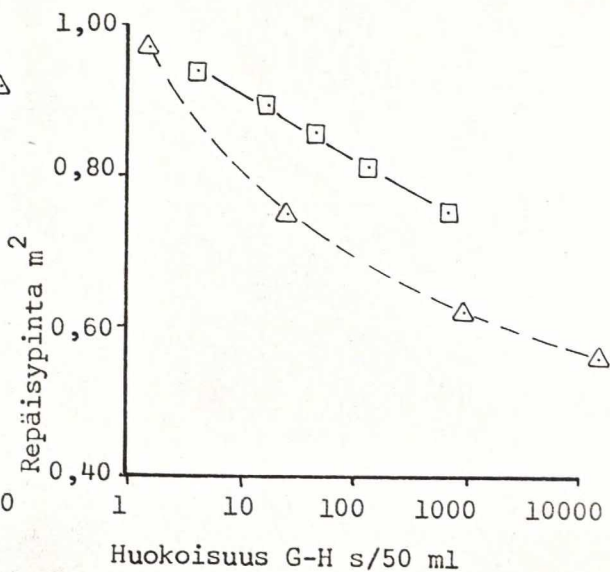
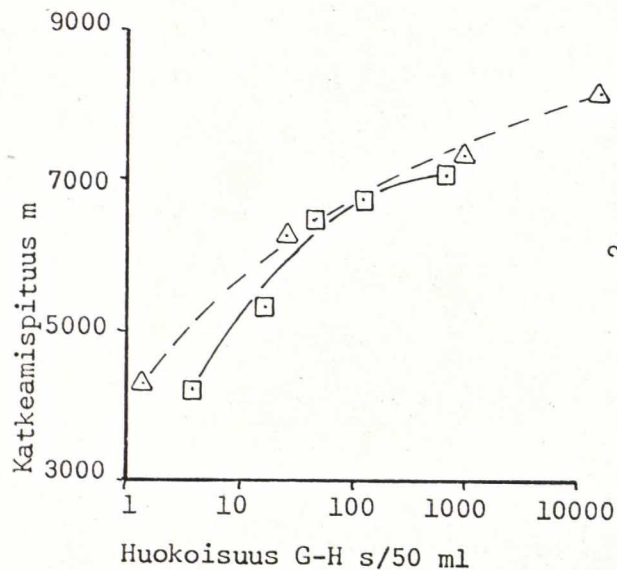
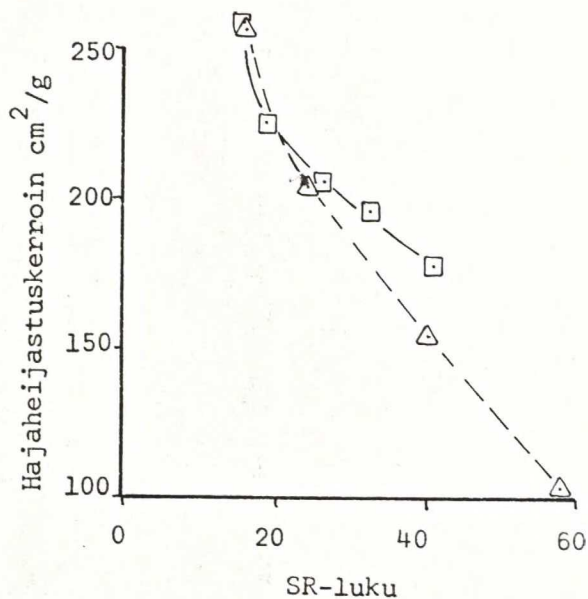
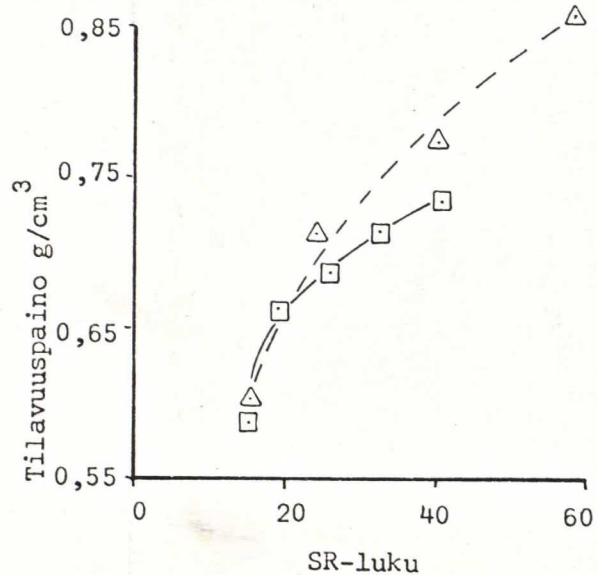
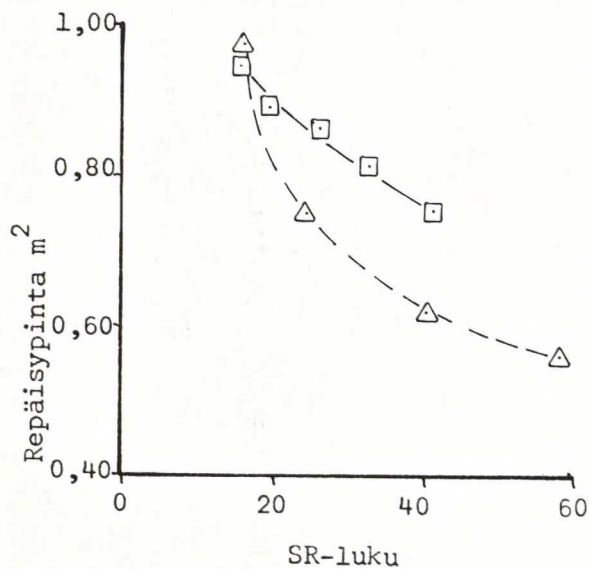
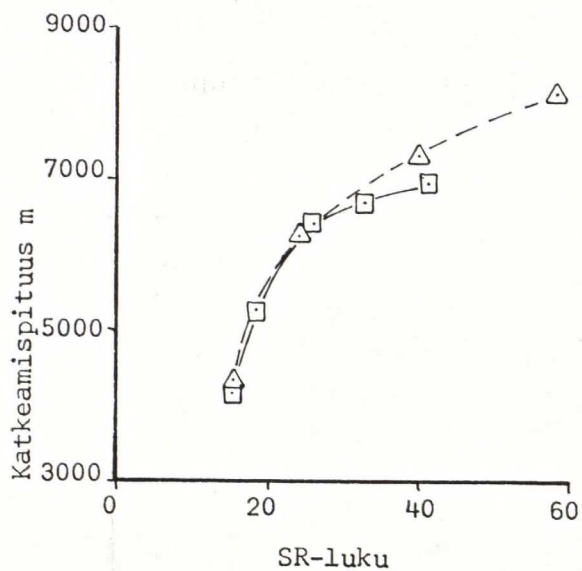
Ominaisrämmäkuormituksen muutos

□ Koepiste 9. 1020 Ws/km 850 r/min 3,0 % 350 l/min

△ Koepiste 10. 1970 Ws/km 850 r/min 2,6 % 350 l/min



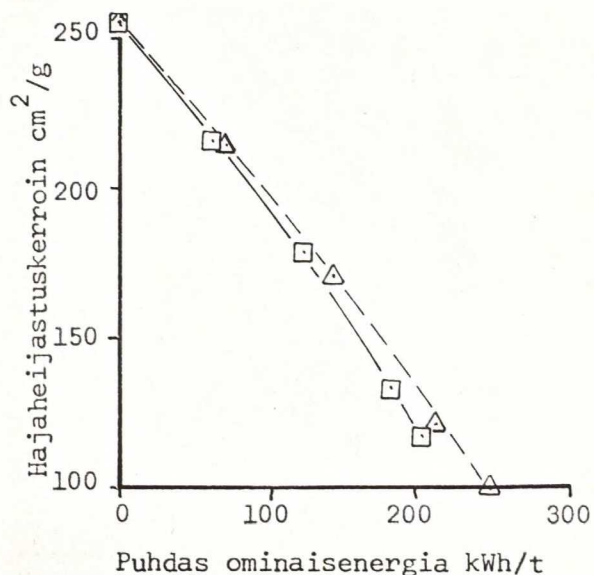
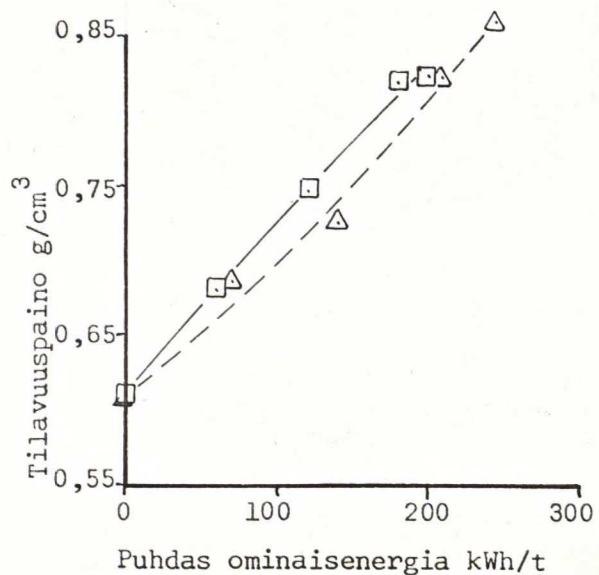
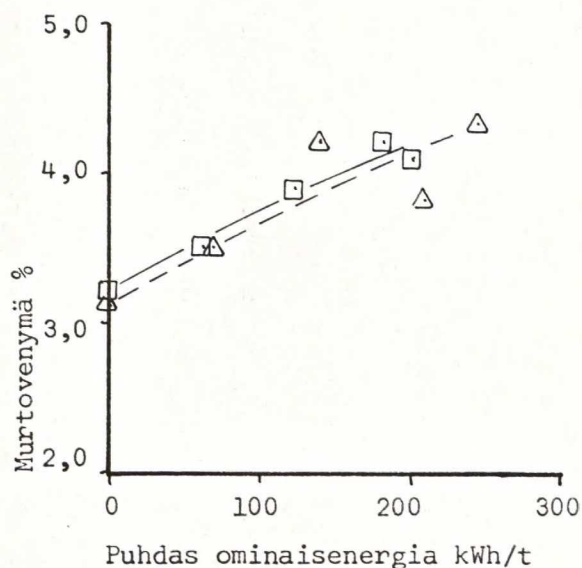
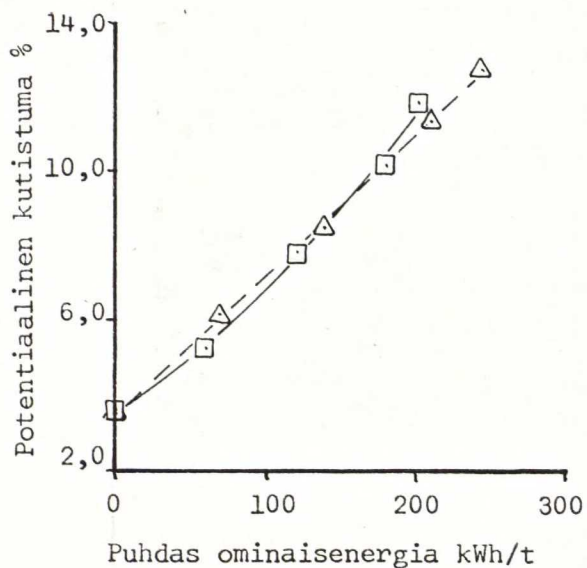
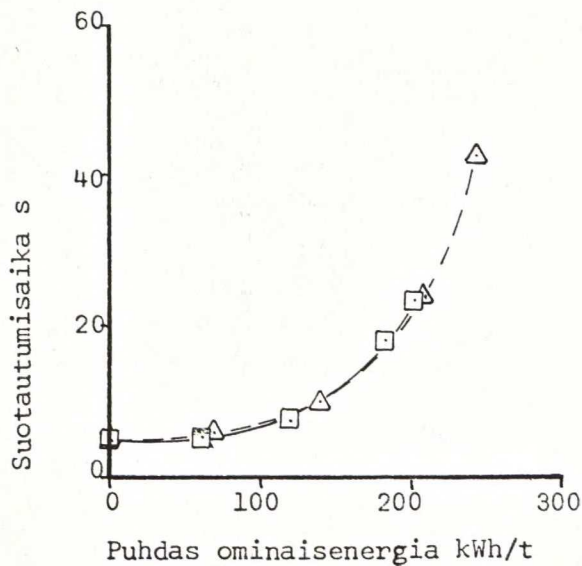
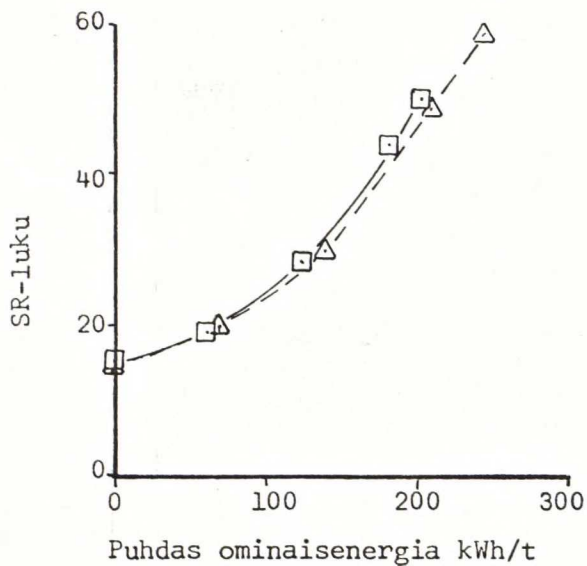


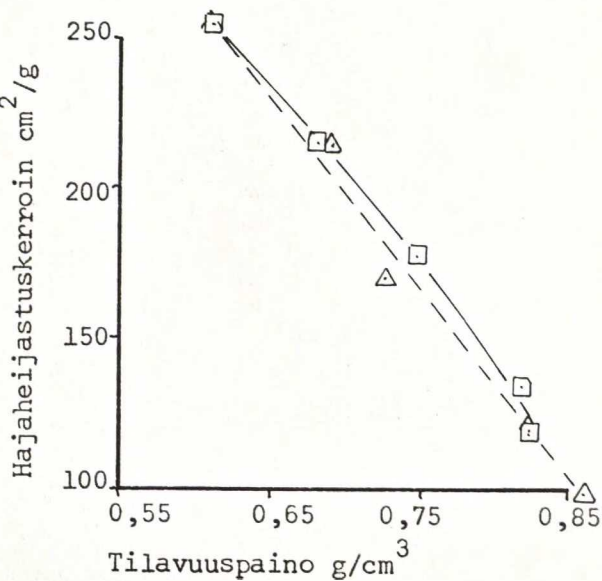
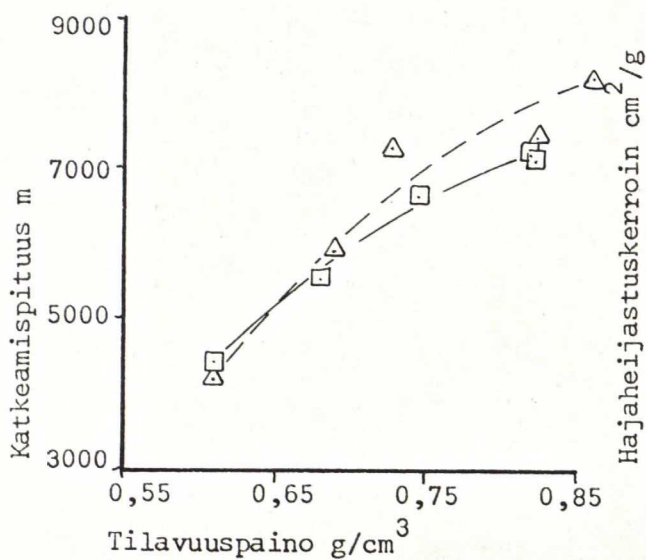
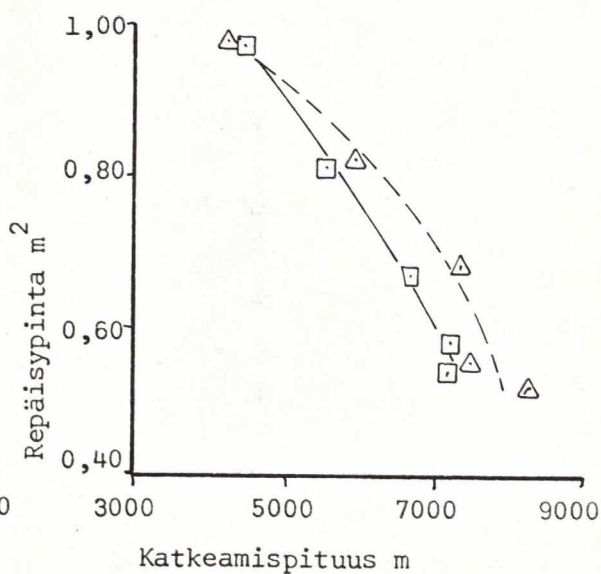
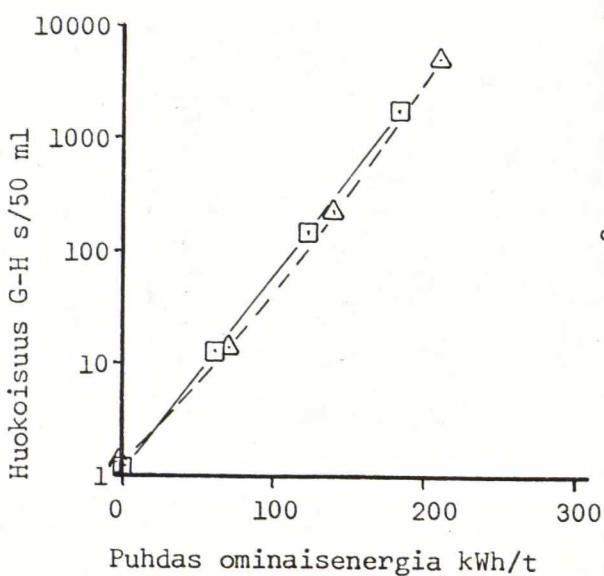
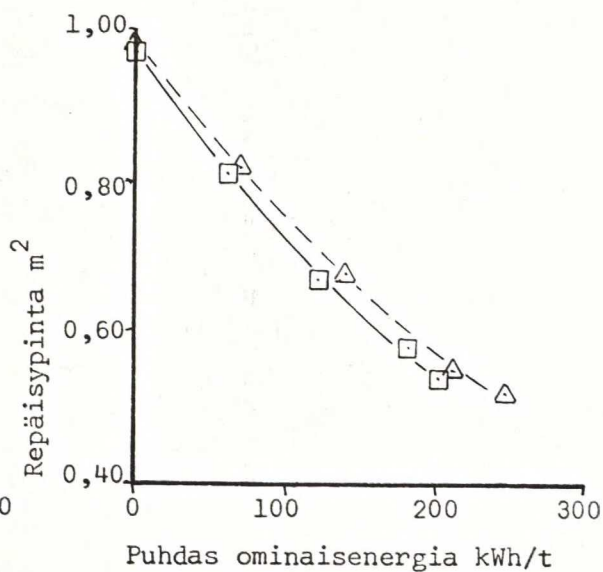
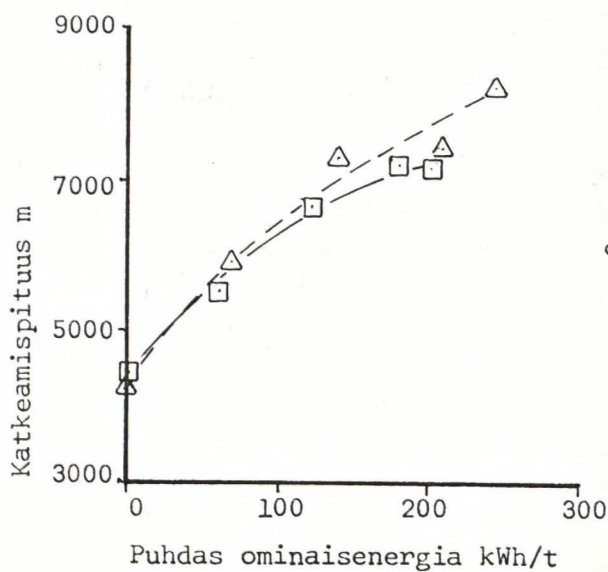


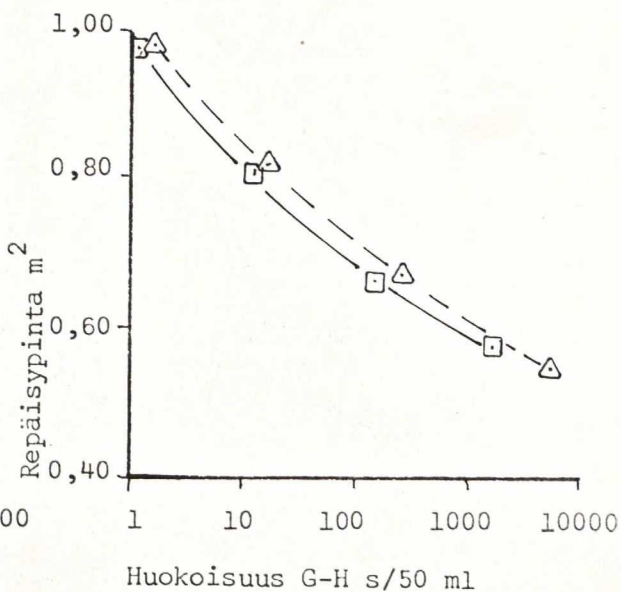
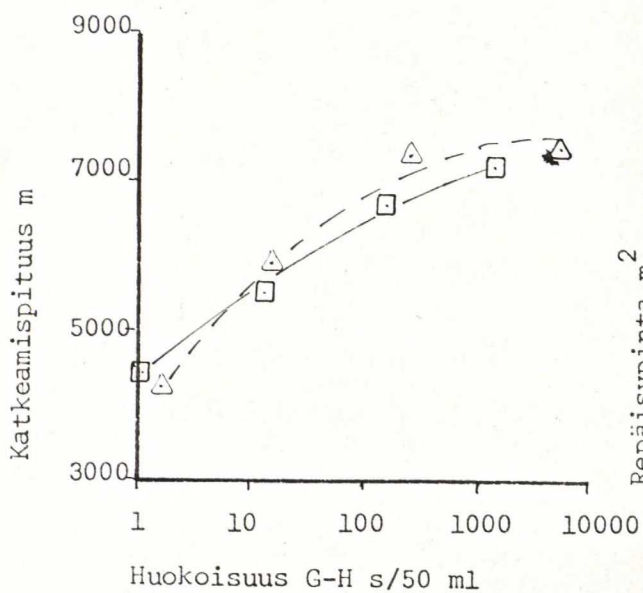
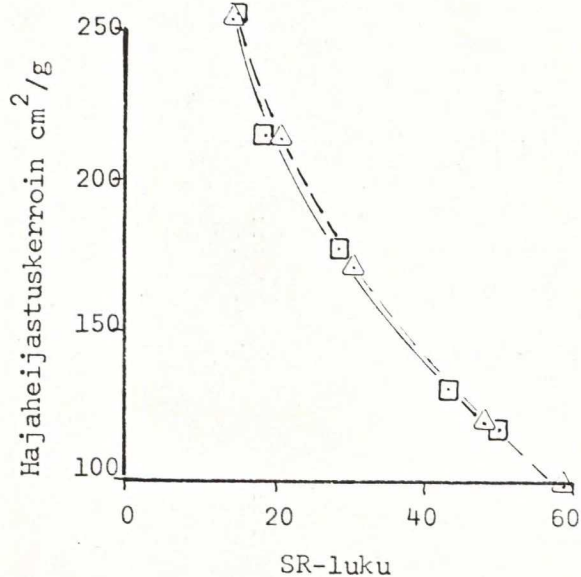
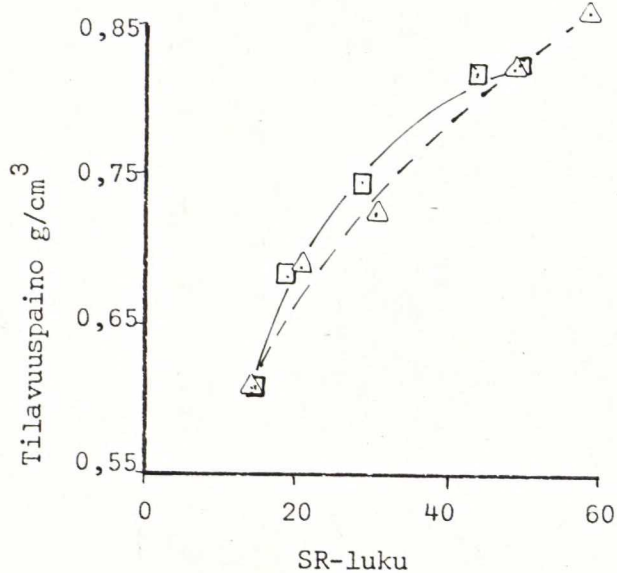
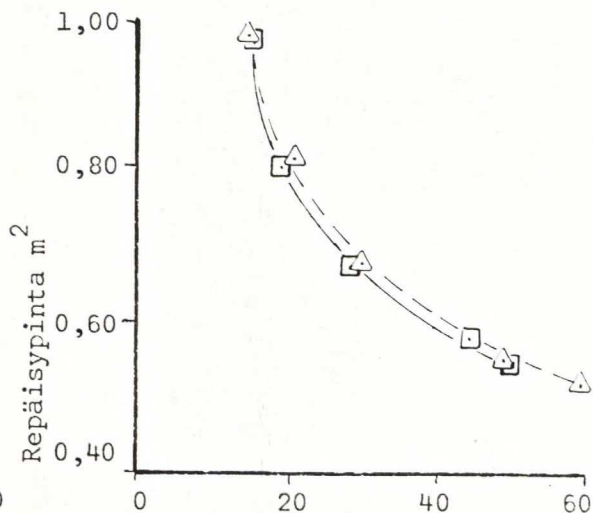
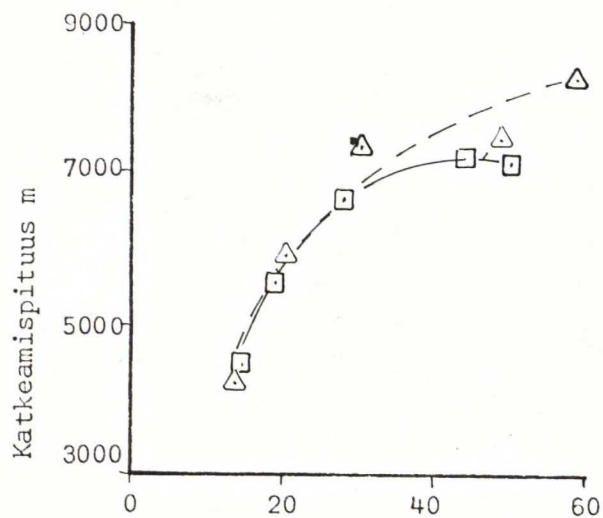
Ominaisärmäkuormituksen muutos

△ Koepiste 4. 2015 Ws/km 450 r/min 3,0 % 500 l/min

□ Koepiste 5. 3500 Ws/km 450 r/min 3,0 % 500 l/min



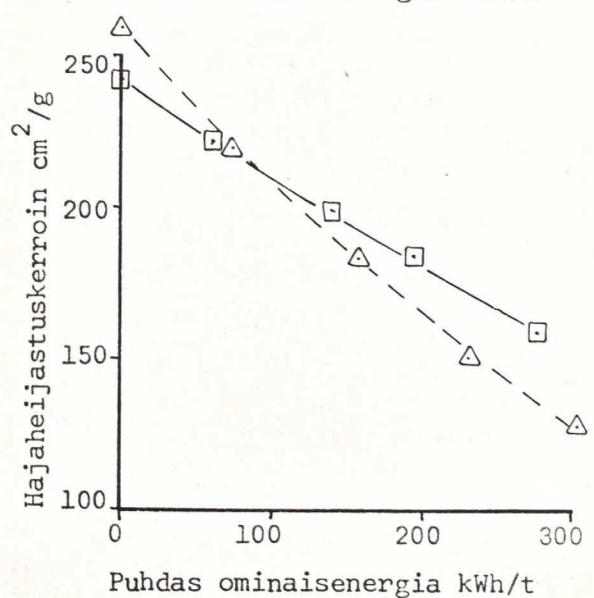
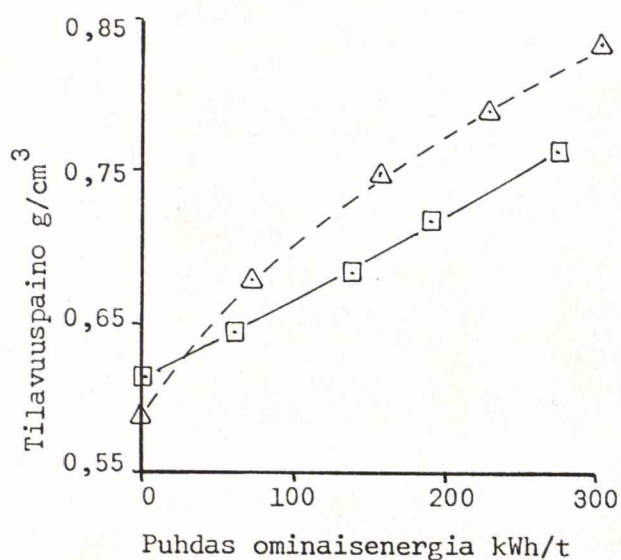
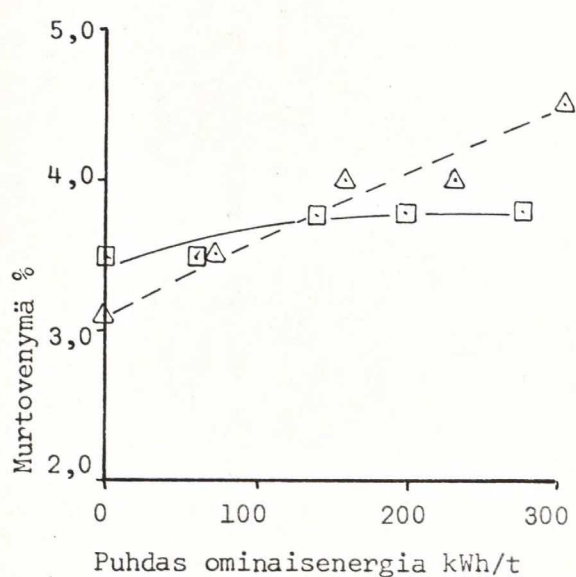
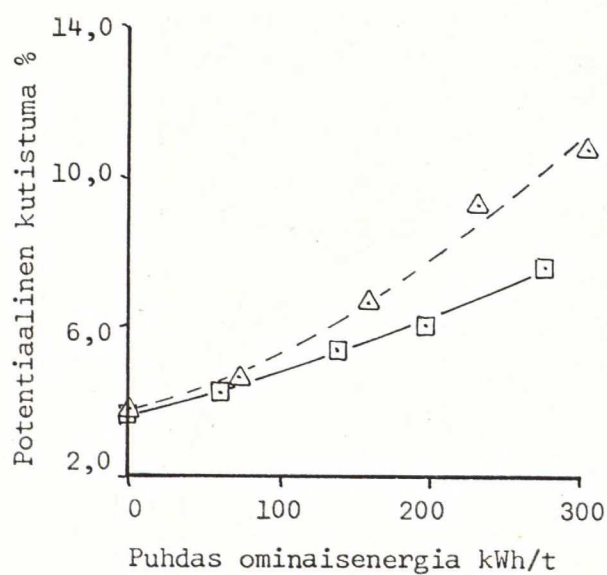
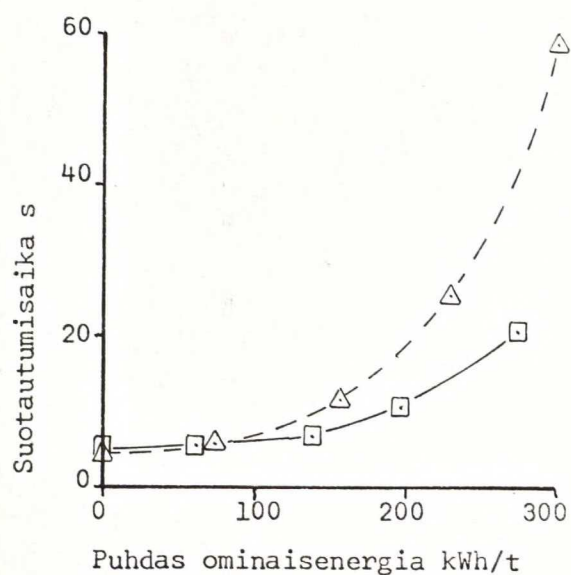
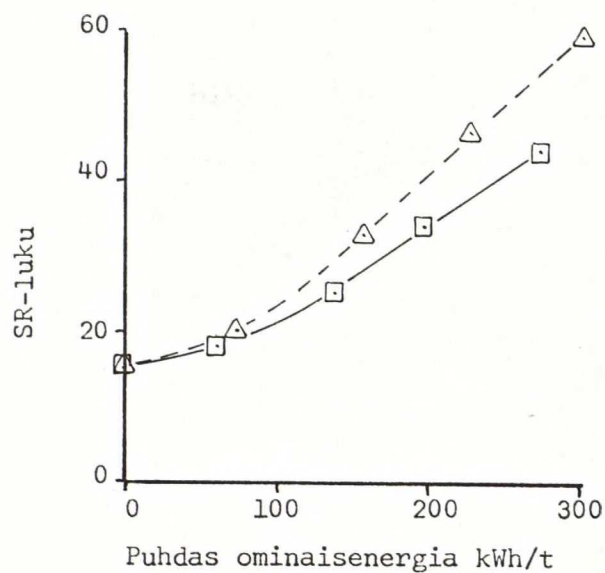


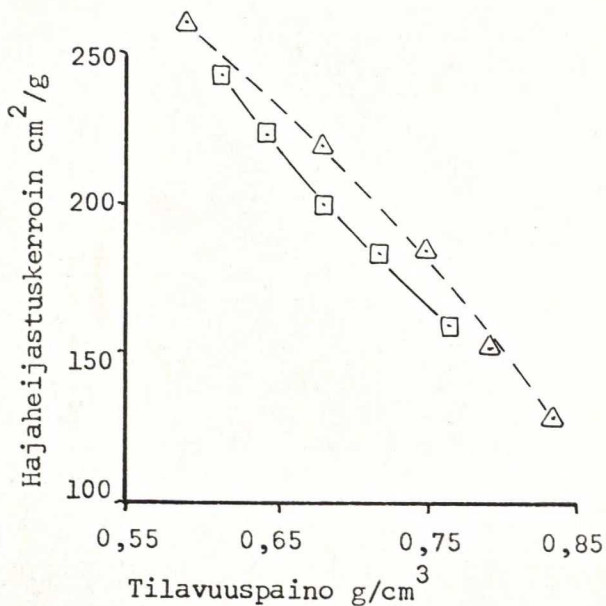
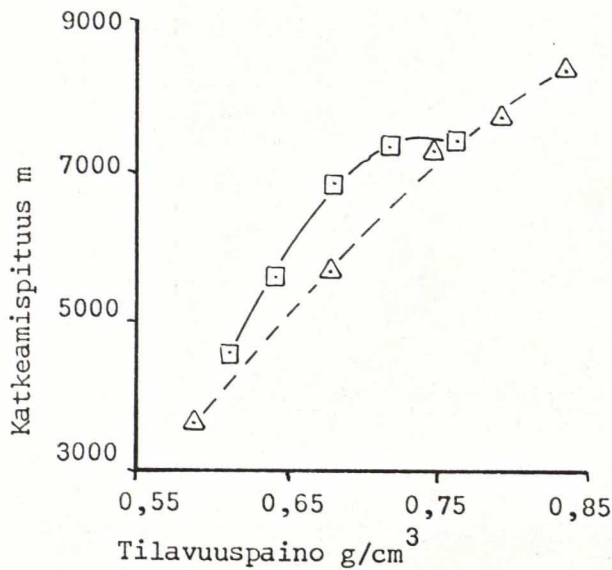
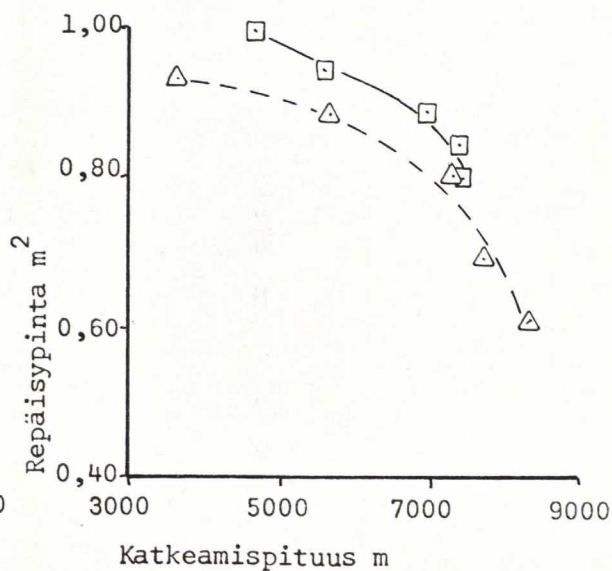
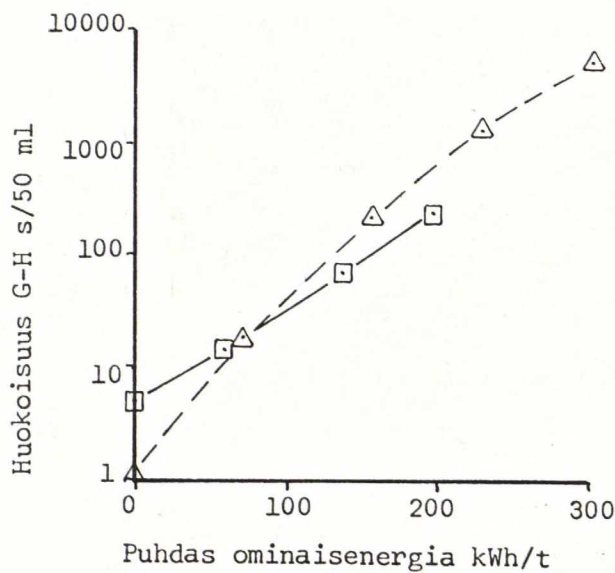
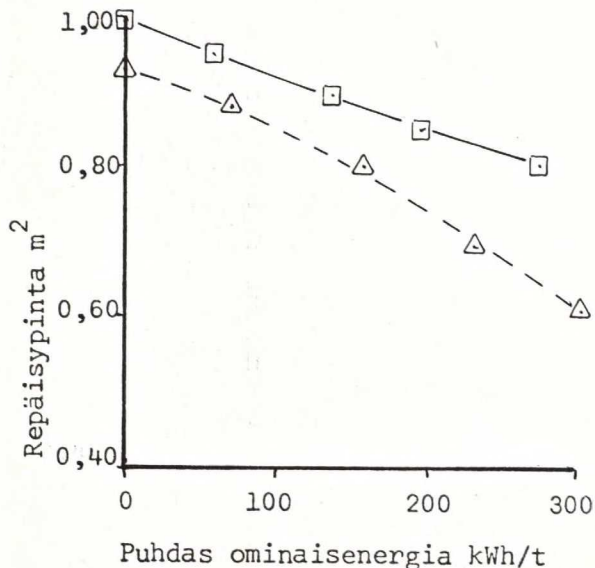
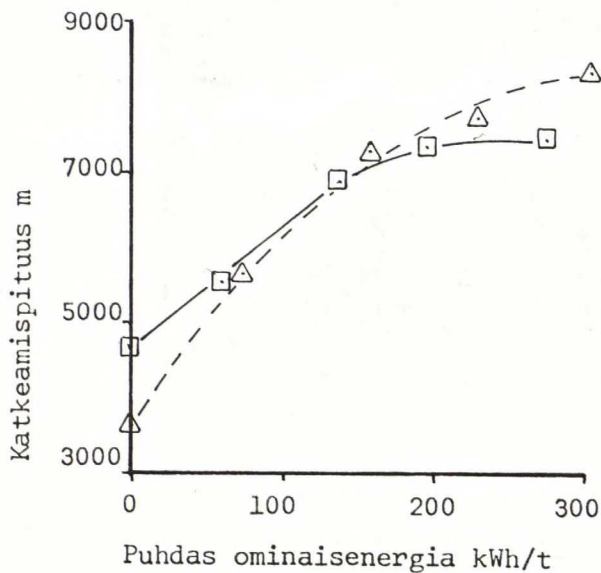


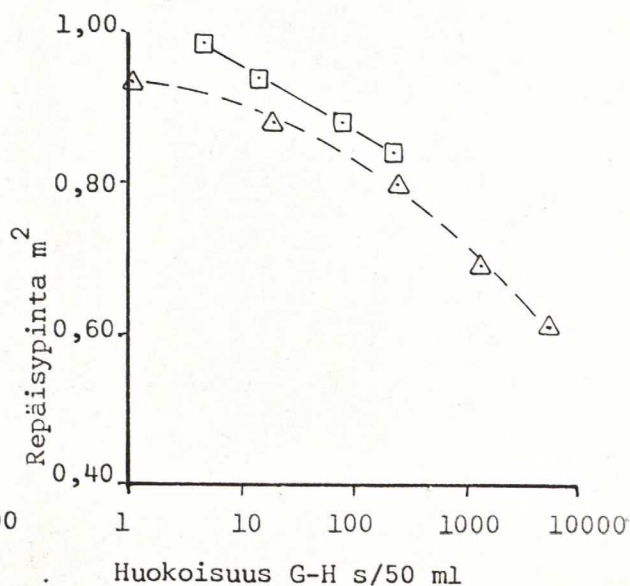
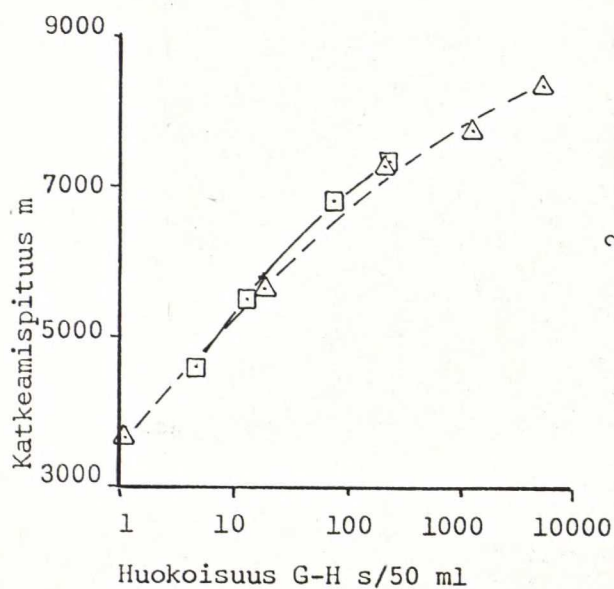
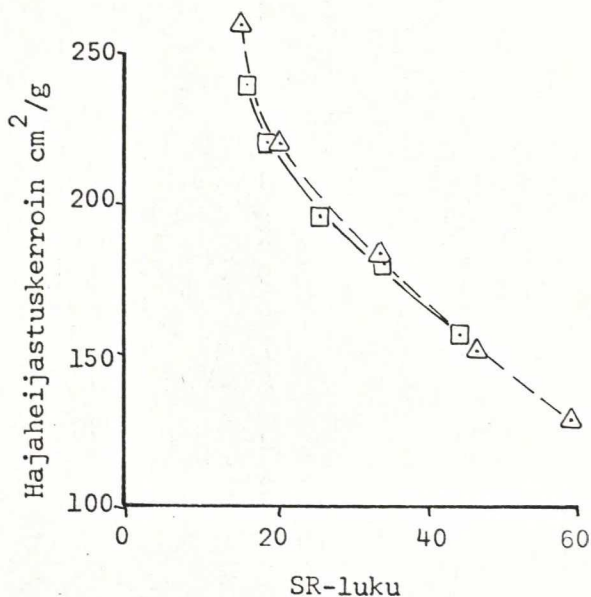
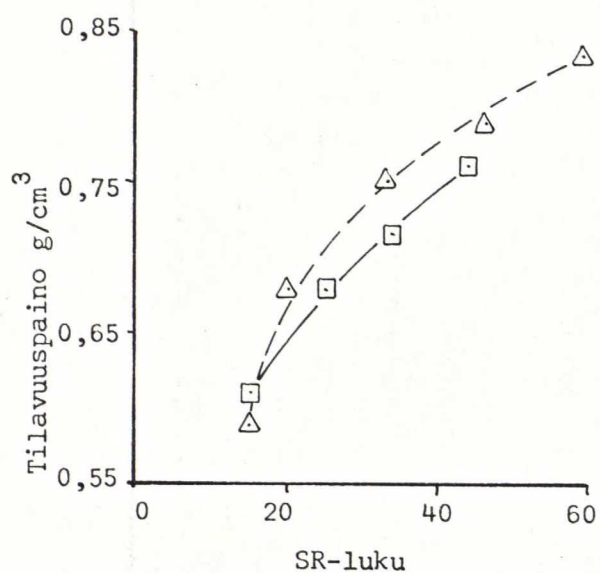
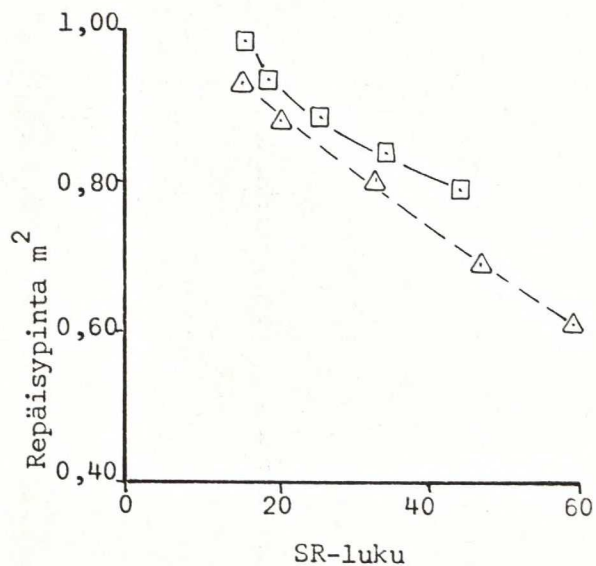
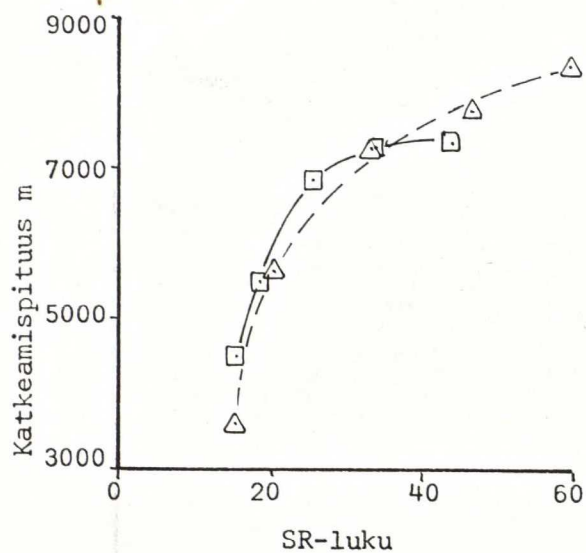
Pyörimisnopeuden muutos

△ Koepiste 2. 850 r/min 1050 Ws/km 2,8 % 500 l/min

□ Koepiste 1. 1500 r/min 1055 Ws/km 2,9 % 500 l/min



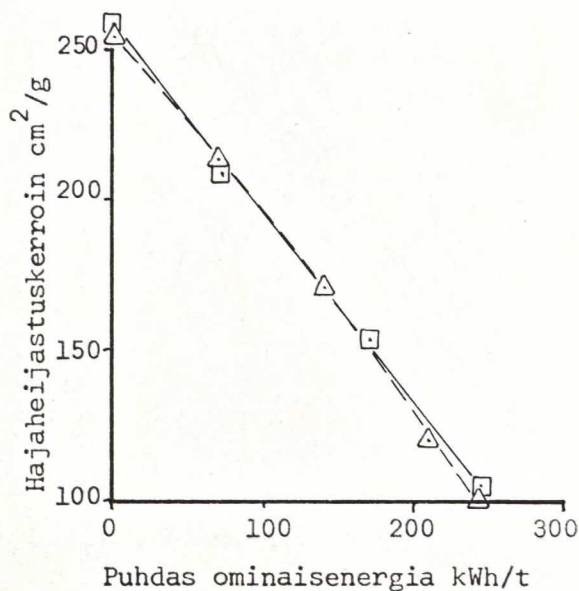
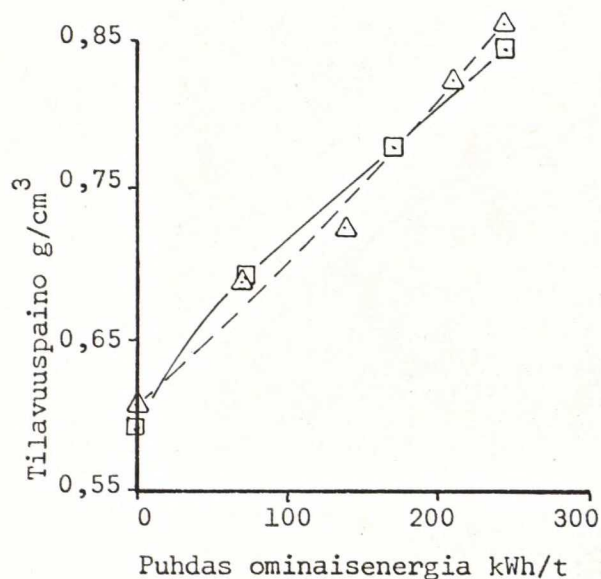
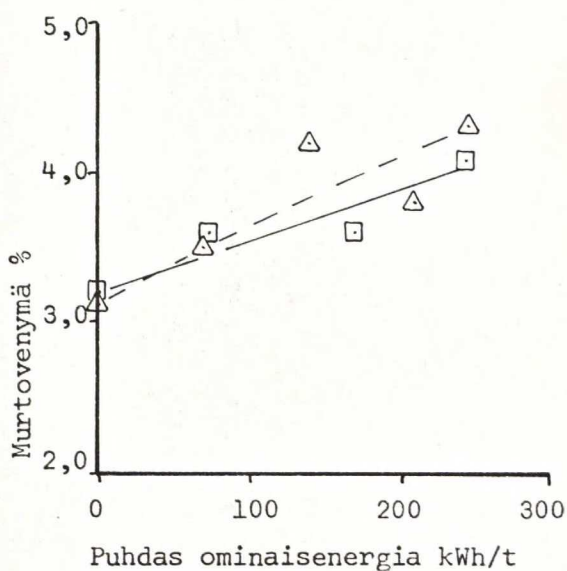
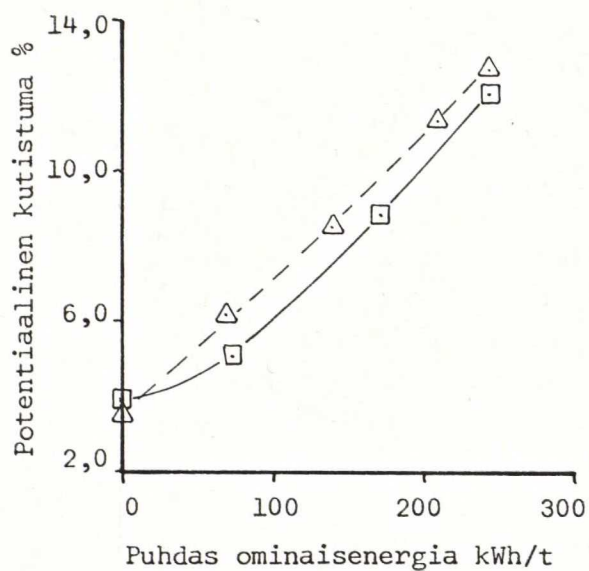
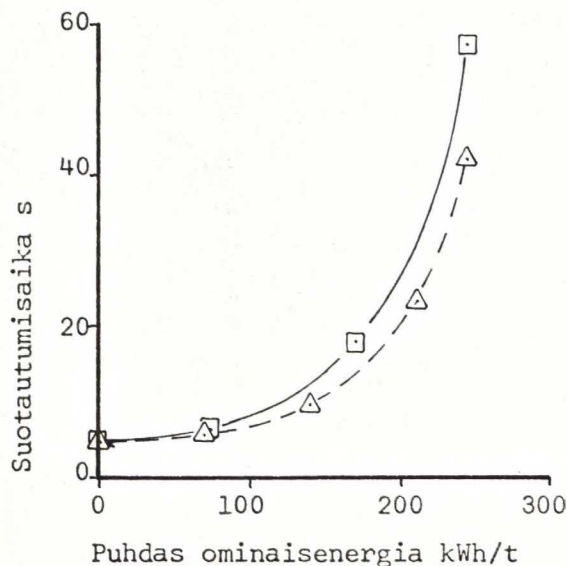
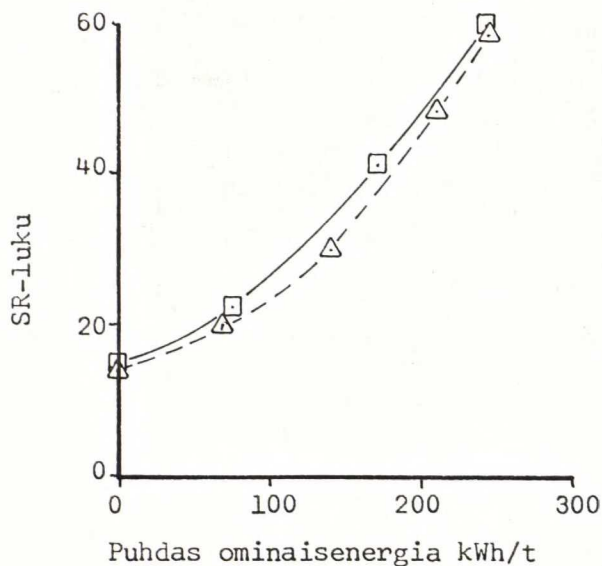


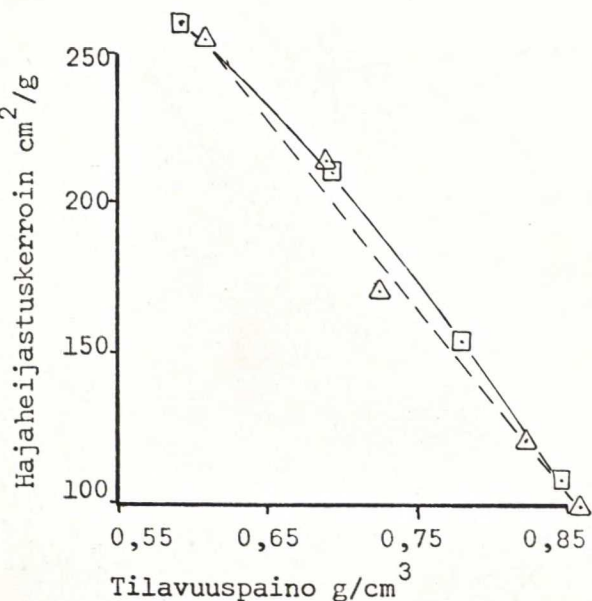
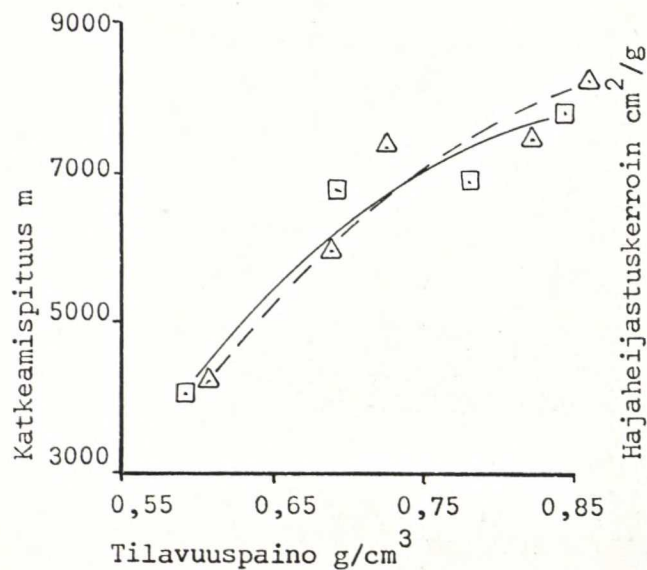
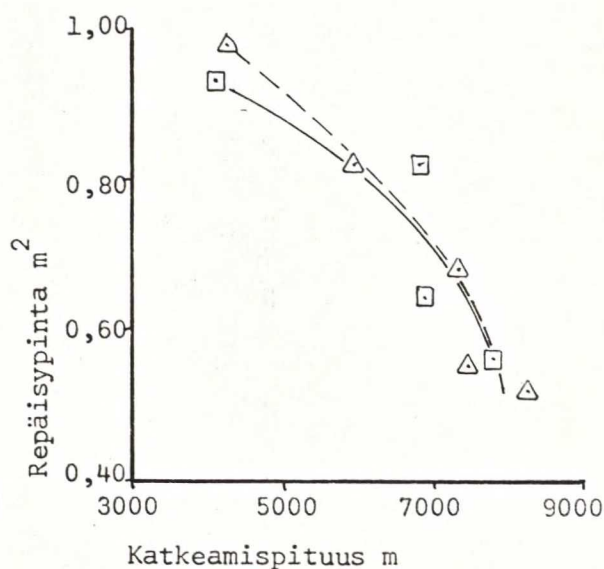
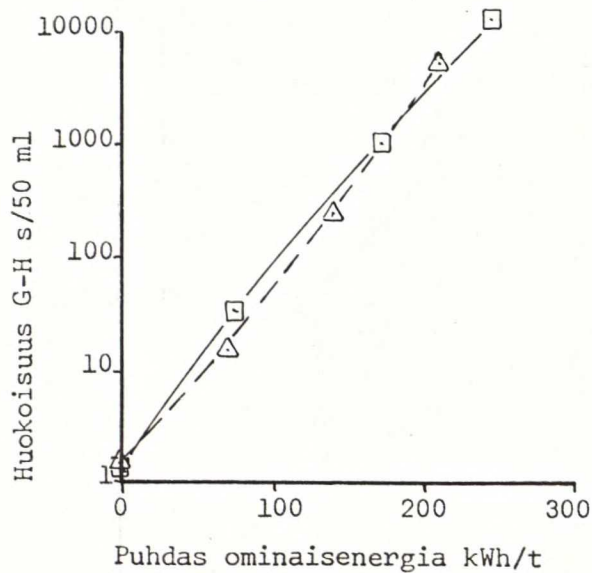
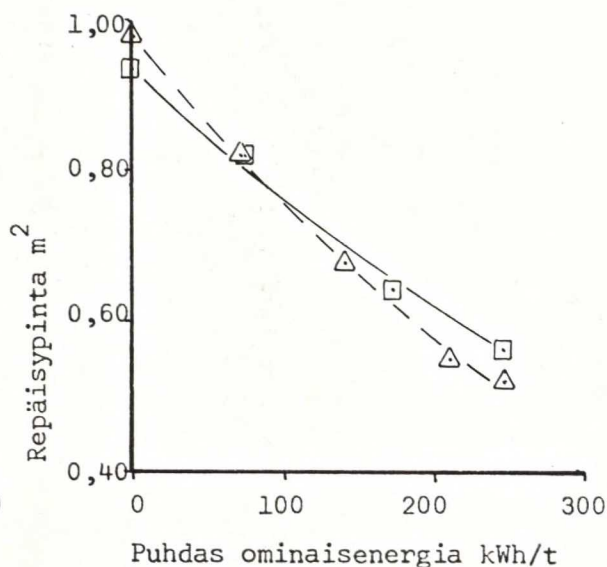
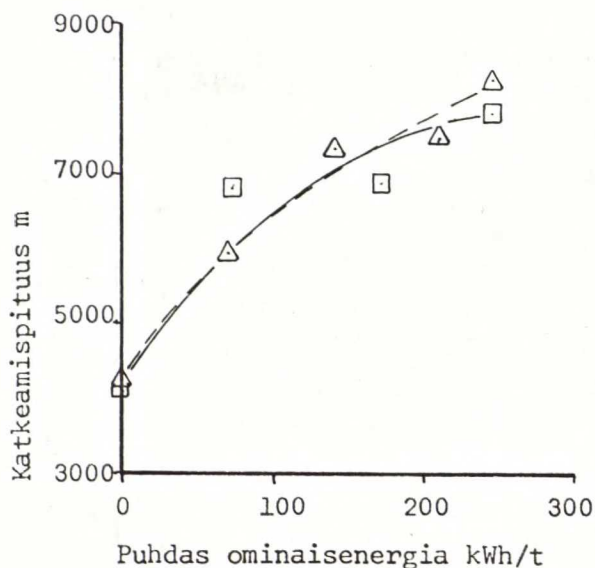


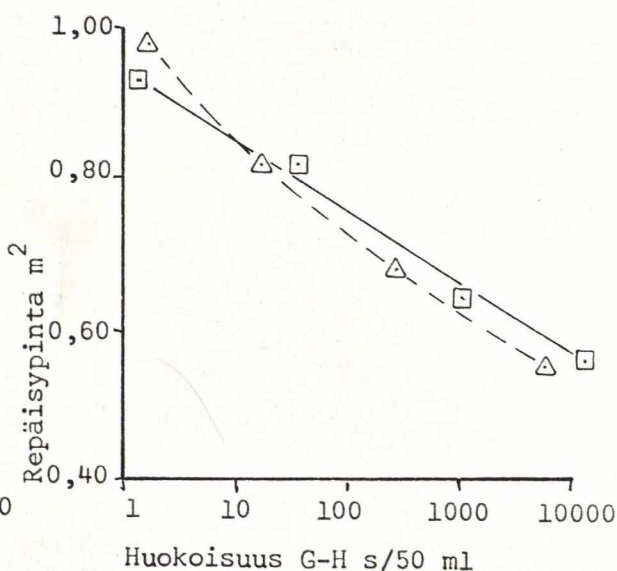
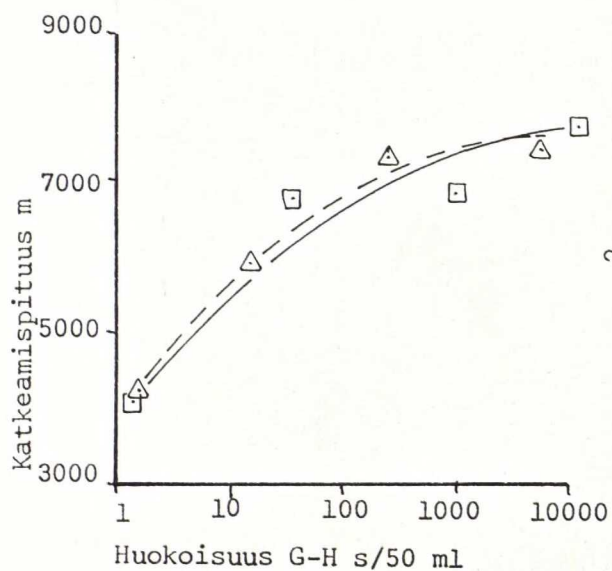
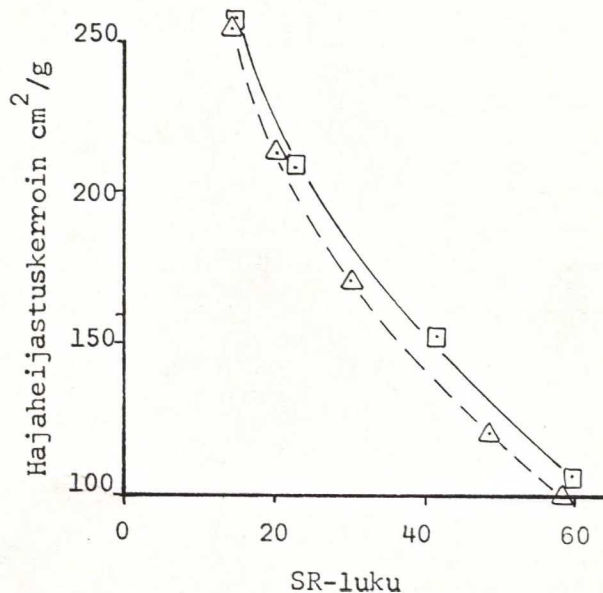
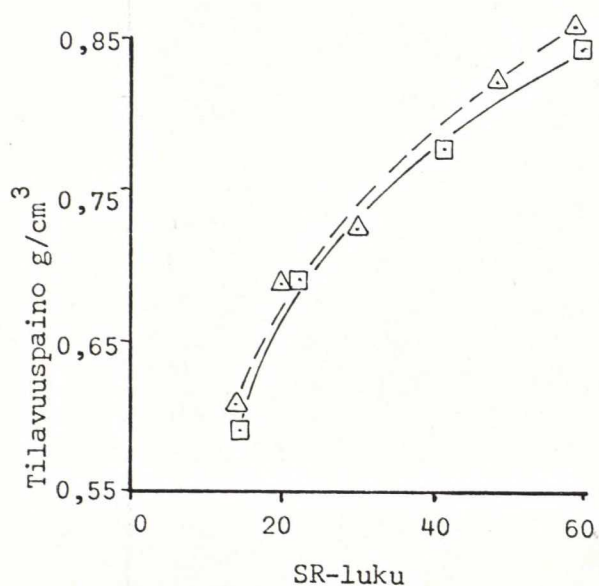
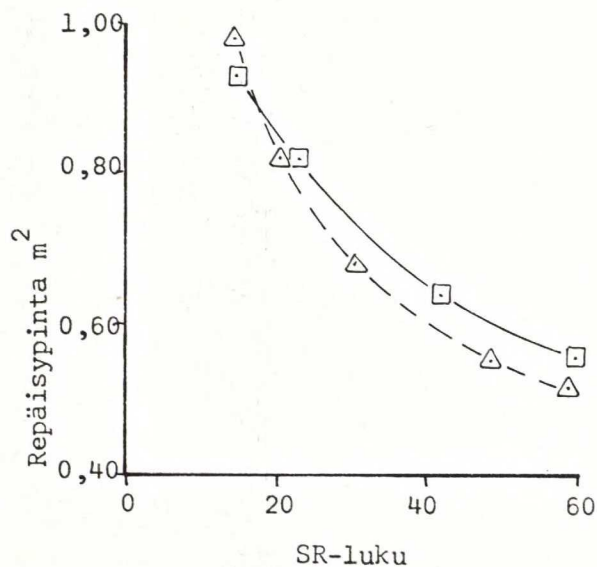
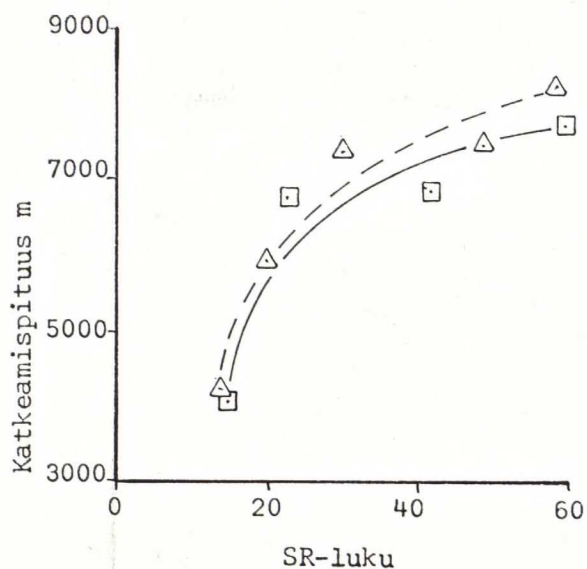
Pyörimisnopeuden muutos

△ Koepiste 4. 450 r/min 2015 Ws/km 3,0 % 500 l/min

□ Koepiste 3. 850 r/min 2020 Ws/km 2,7 % 500 l/min



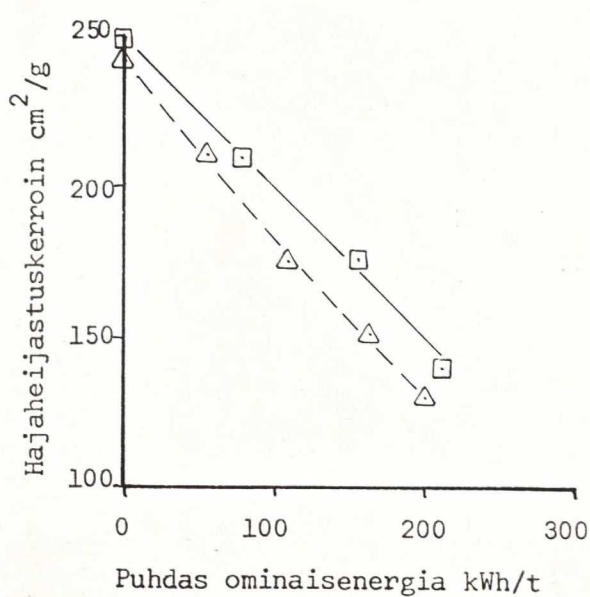
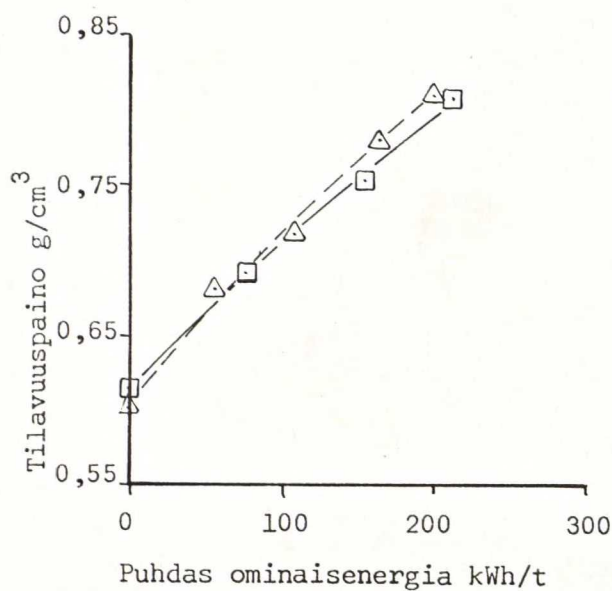
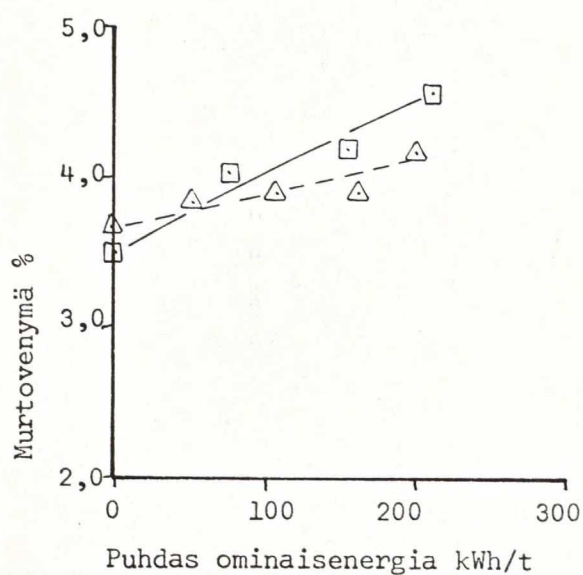
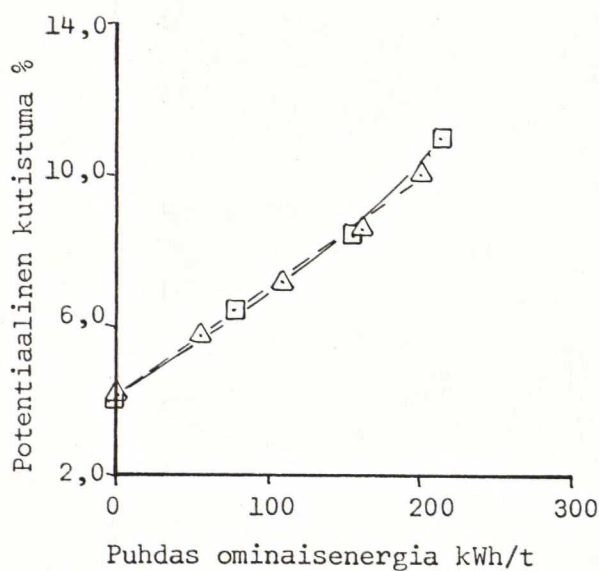
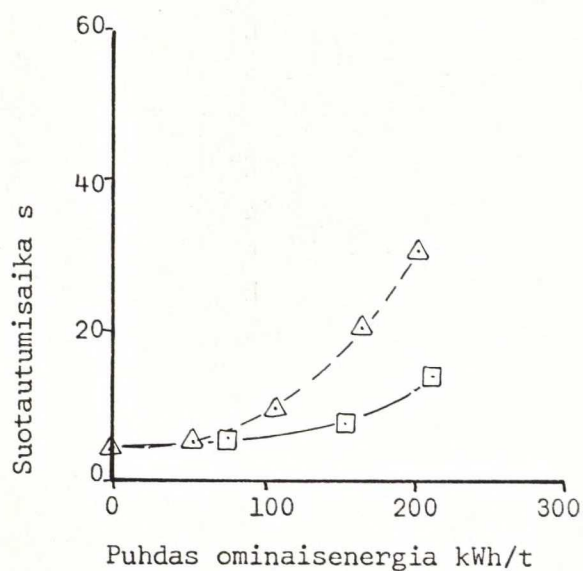
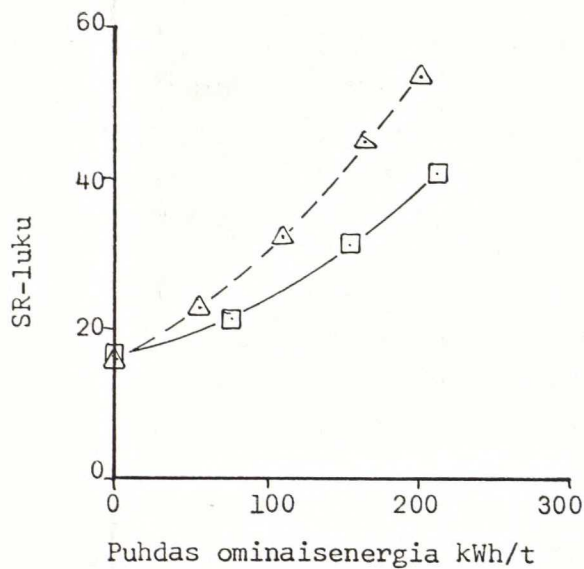


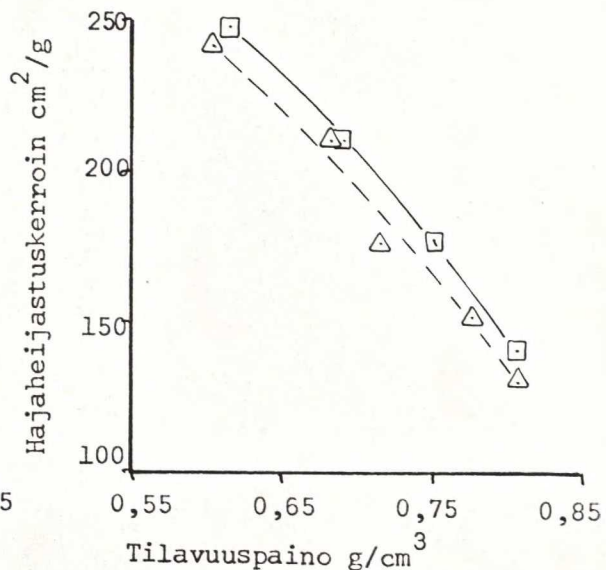
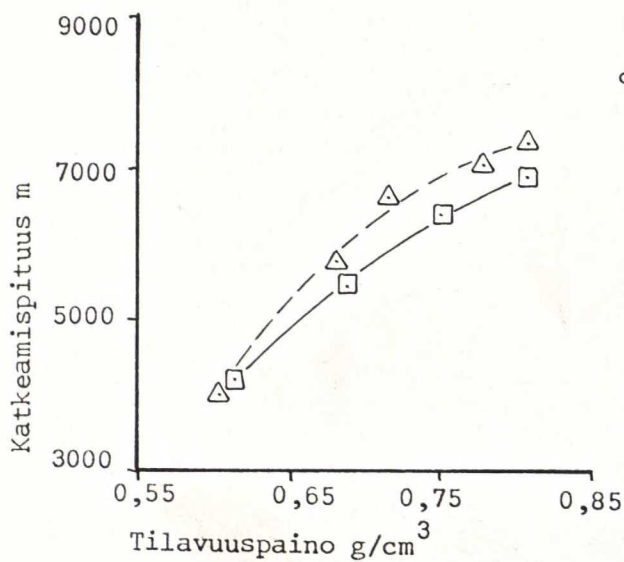
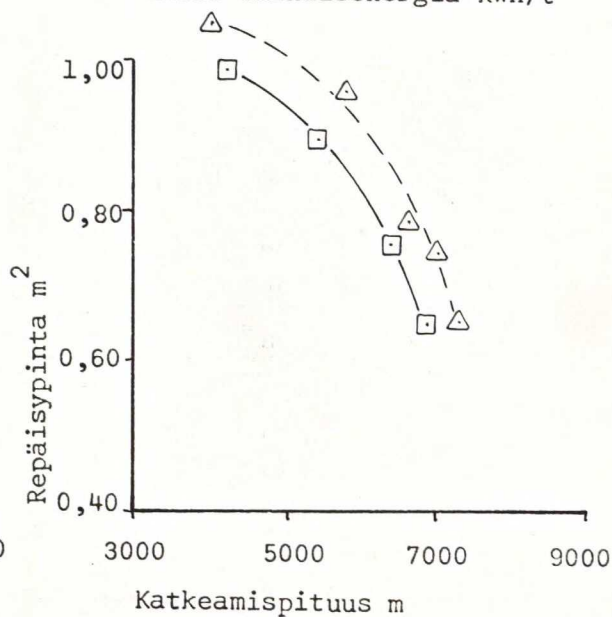
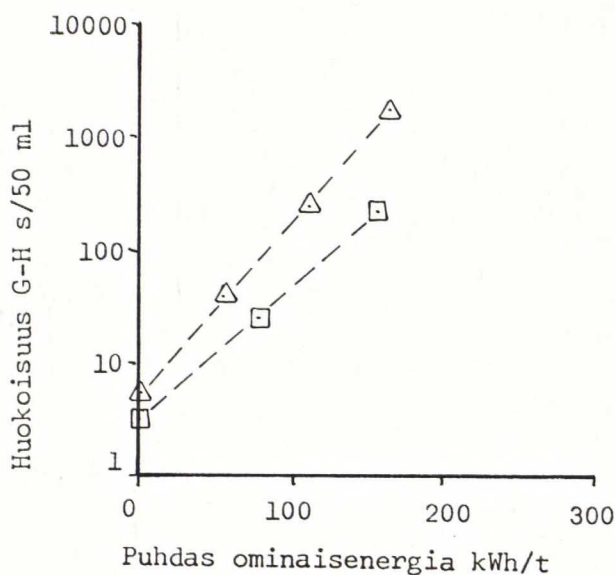
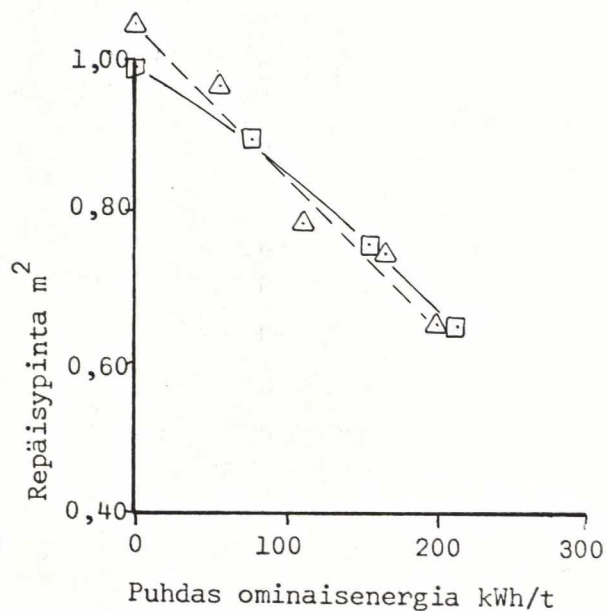
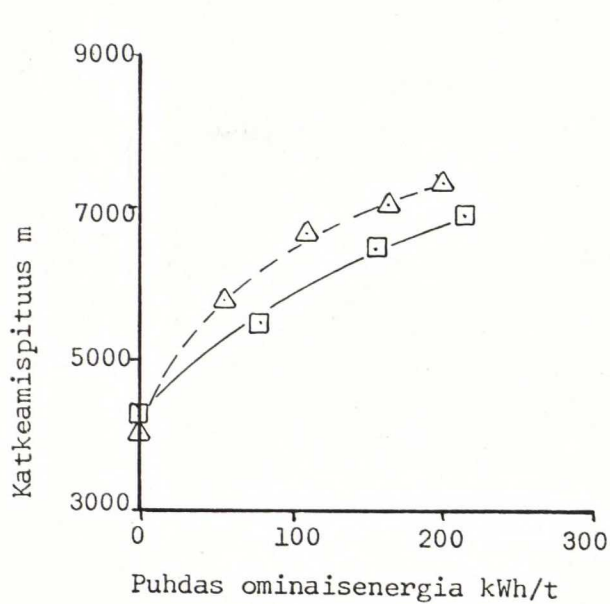


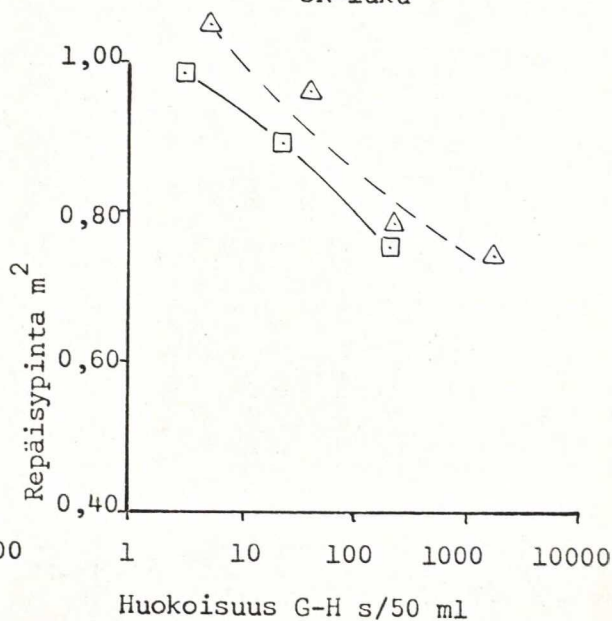
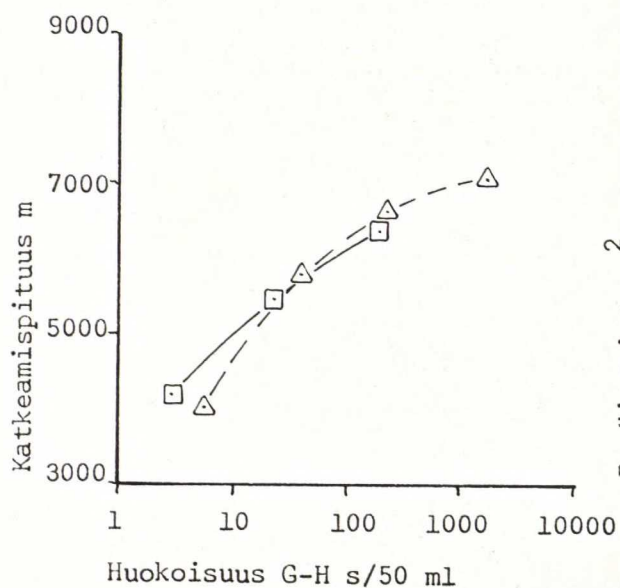
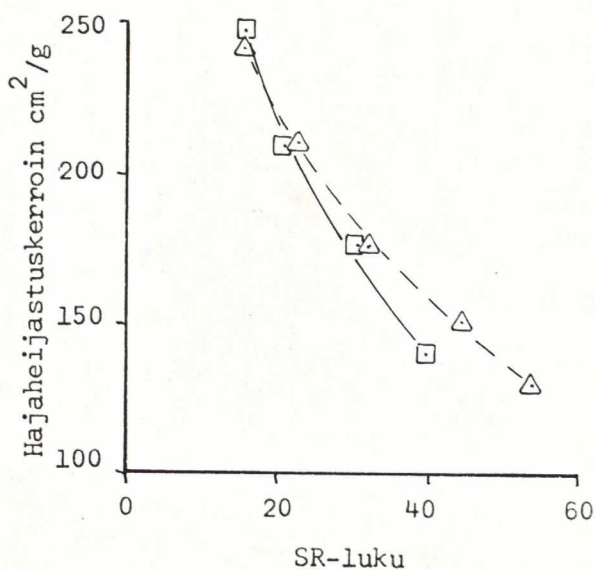
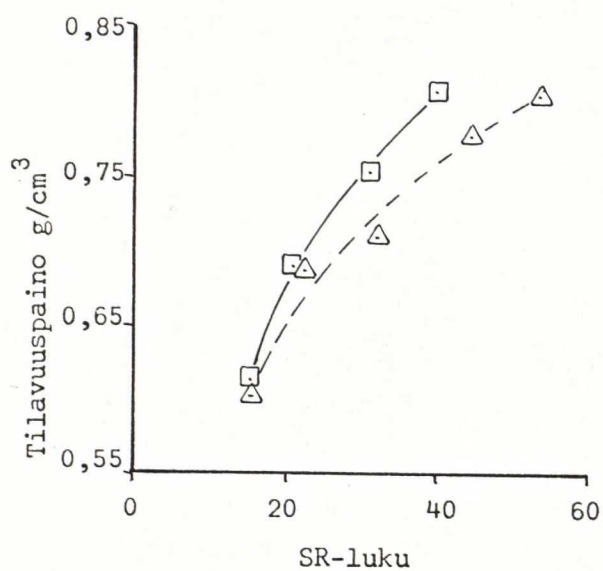
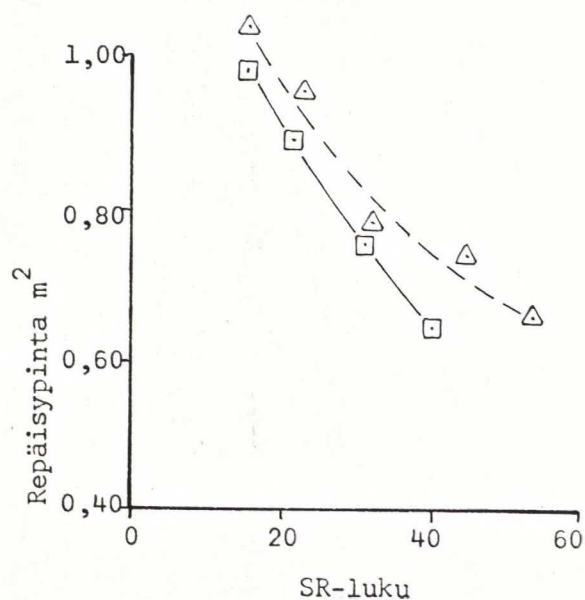
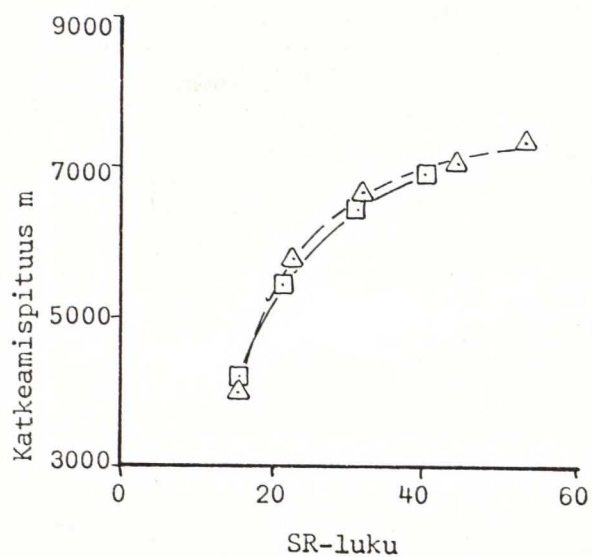
Pyörimisnopeuden muutos

□ Koepiste 8. 450 r/min 2035 Ws/km 3,7 % 500 l/min

△ Koepiste 7. 850 r/min 2010 Ws/km 3,7 % 500 l/min



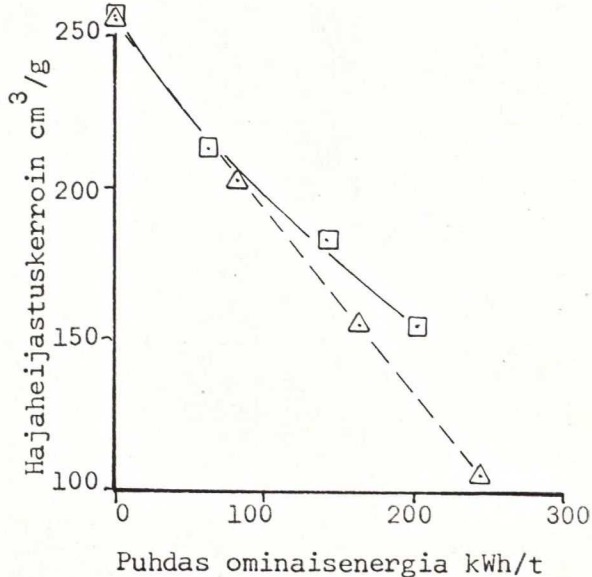
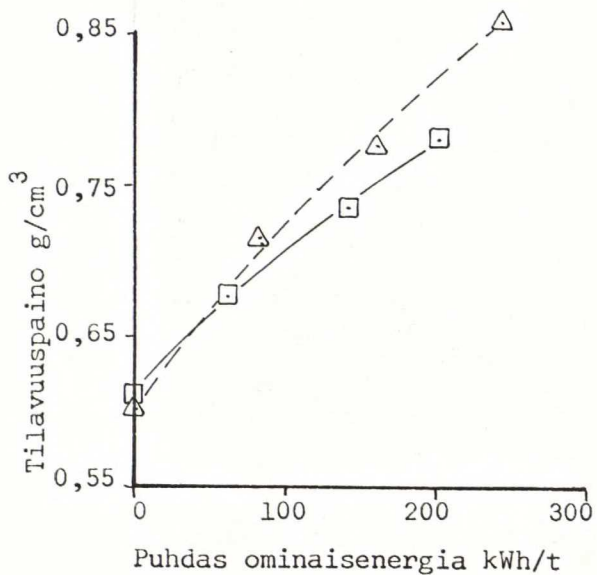
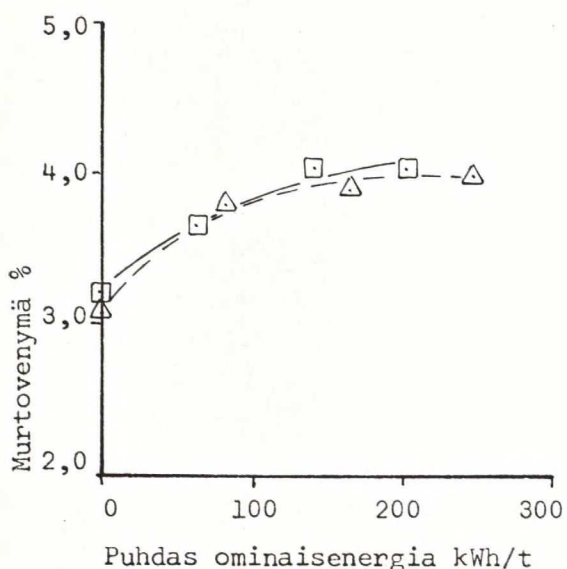
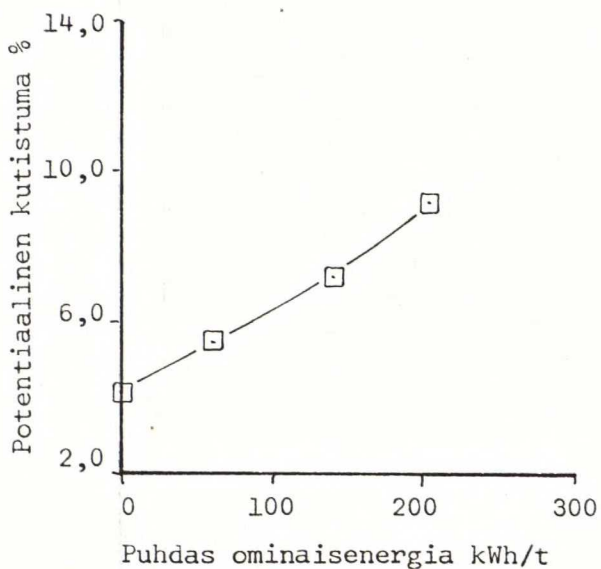
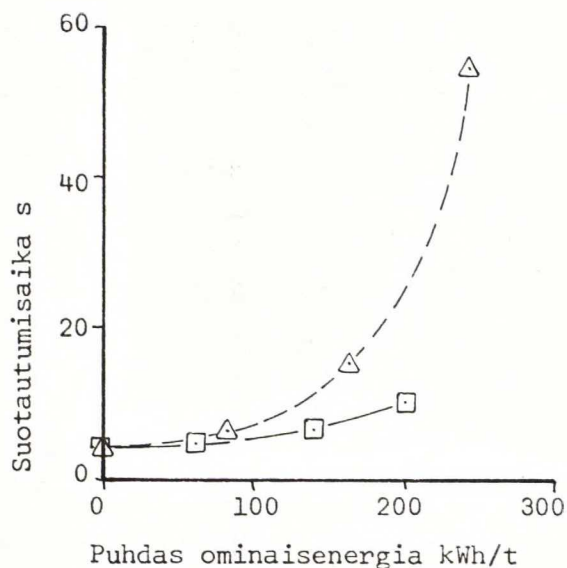
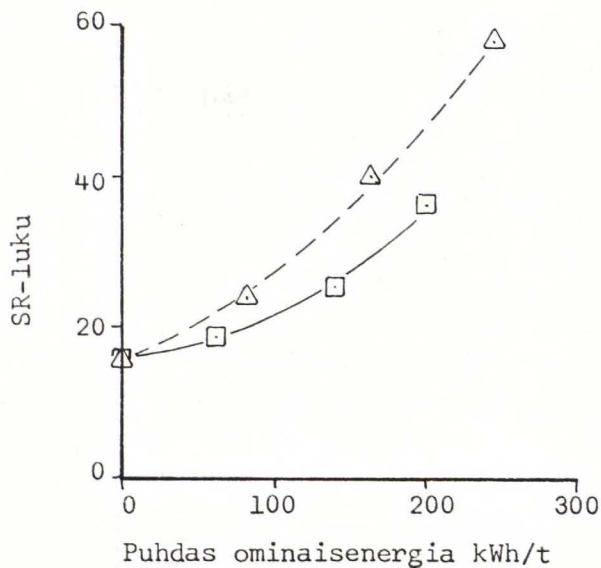


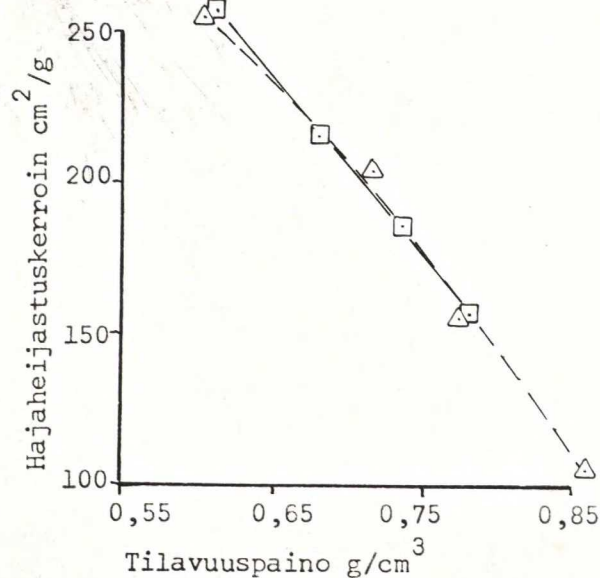
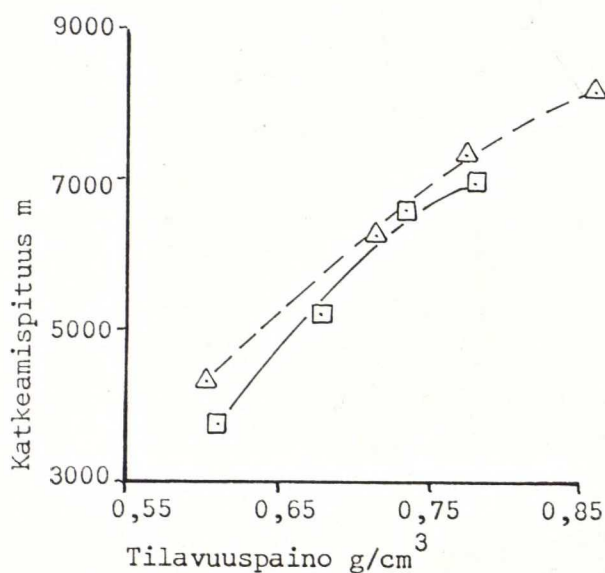
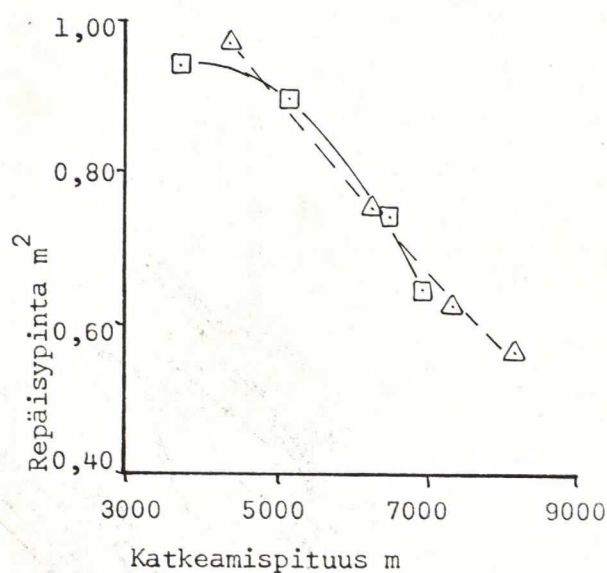
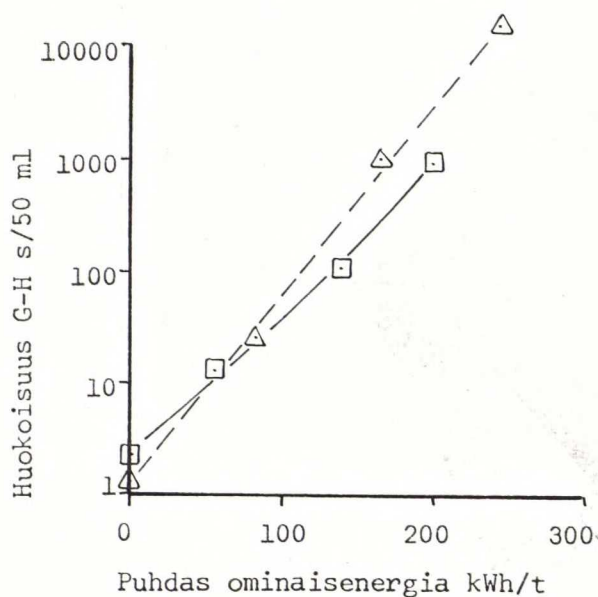
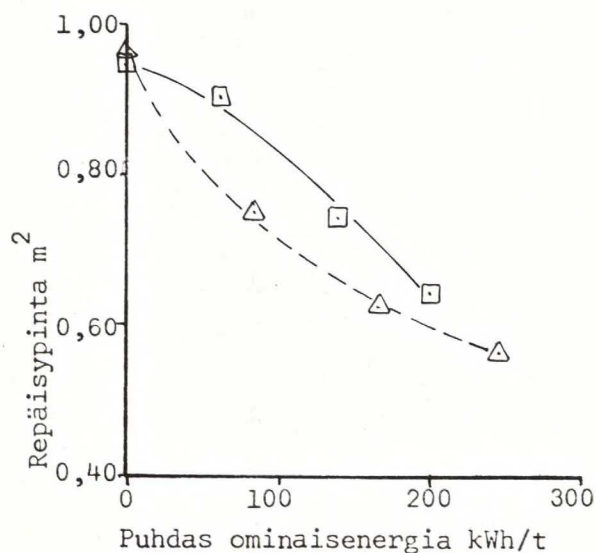
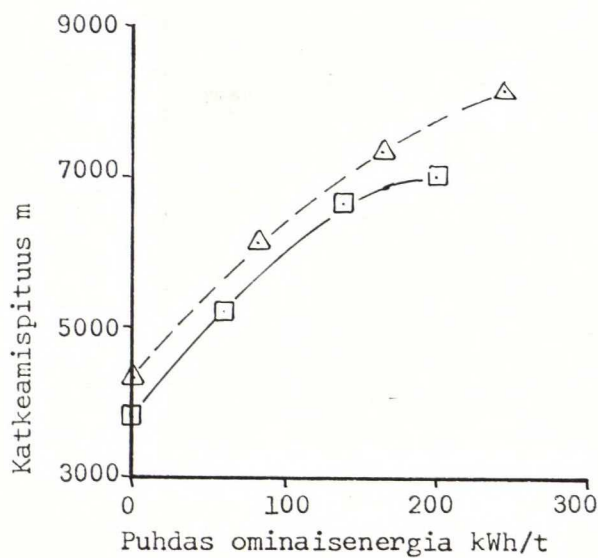


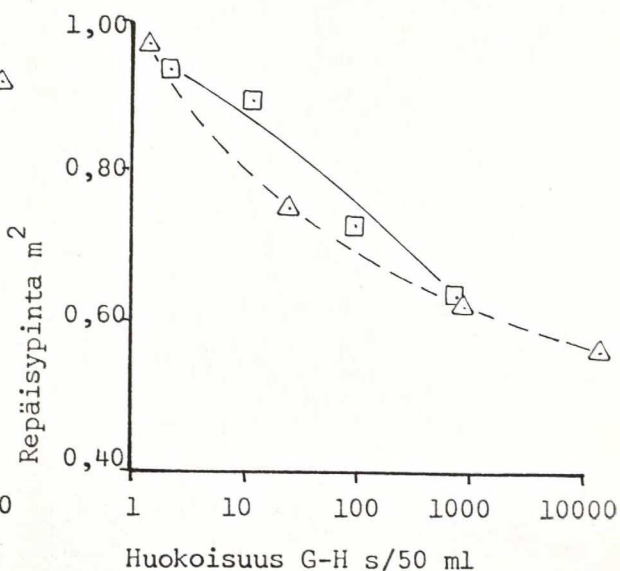
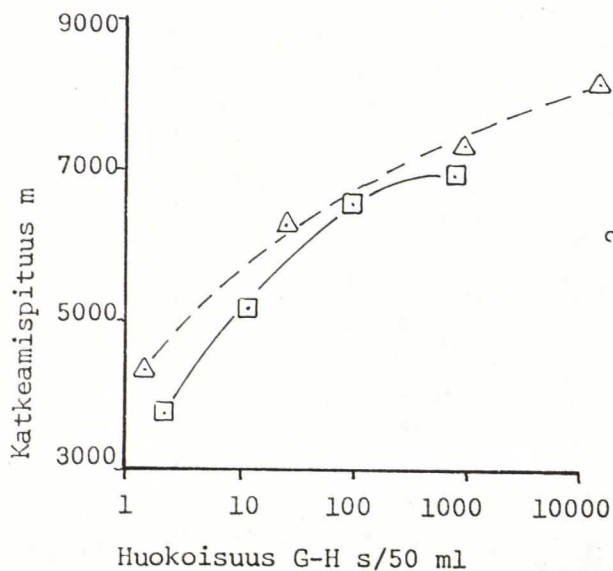
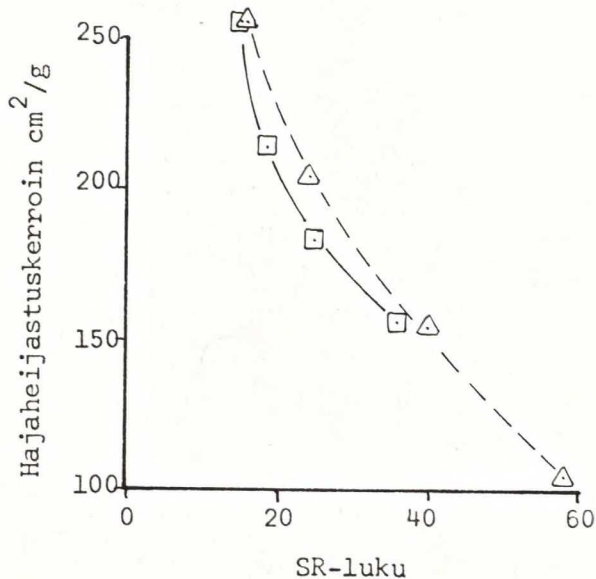
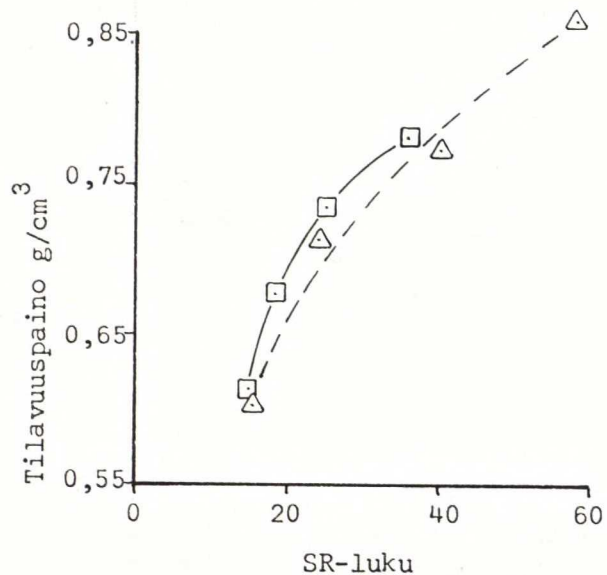
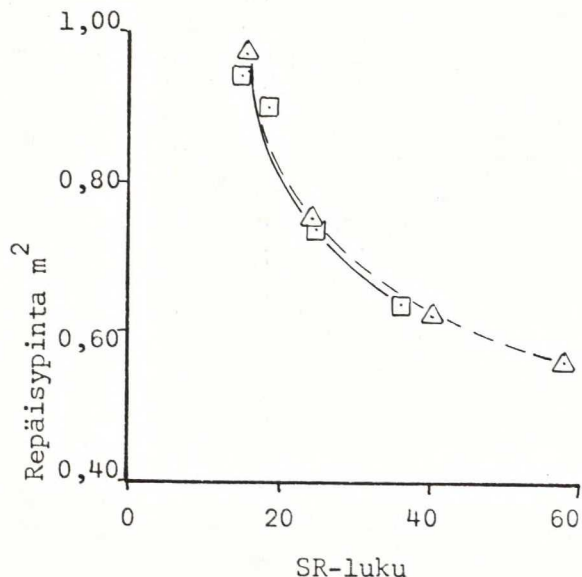
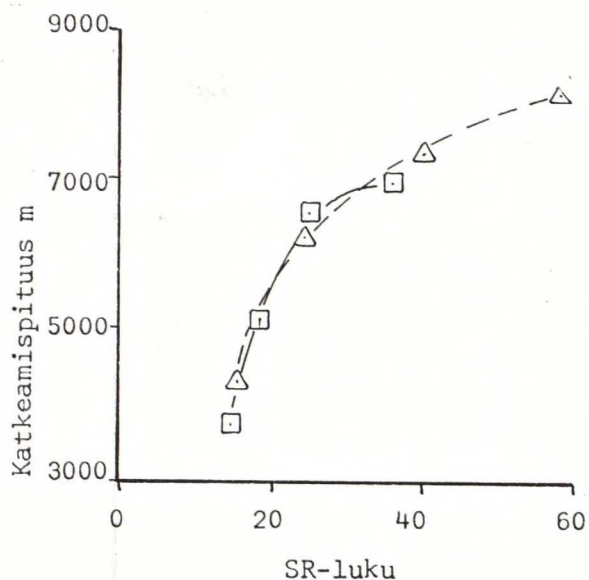
Pyörimisnopeuden muutos

□ Koepiste 11. 450 r/min 1980 Ws/km 3,2 % 350 l/min

△ Koepiste 10. 850 r/min 1970 Ws/km 2,6 % 350 l/min



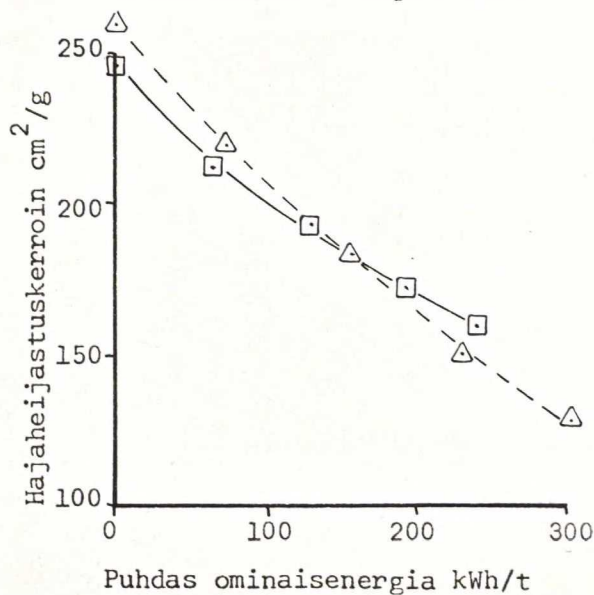
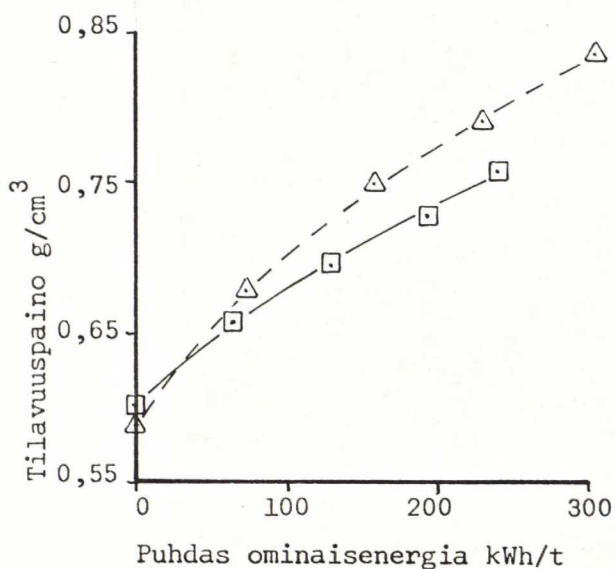
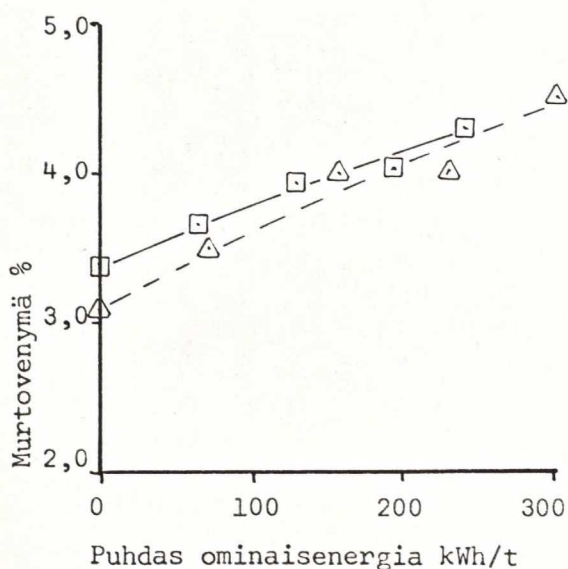
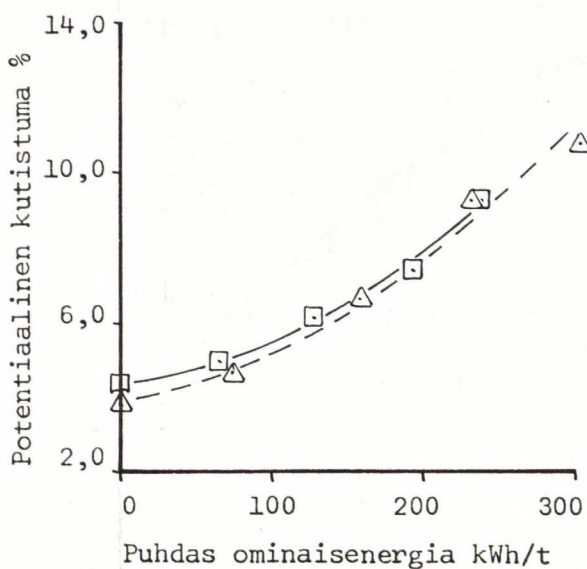
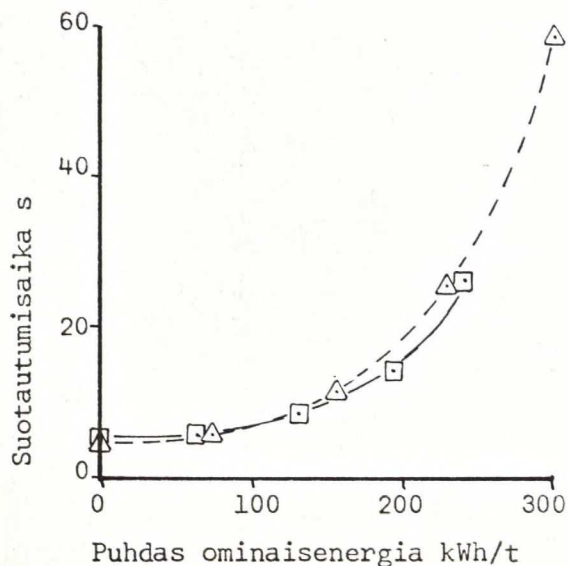
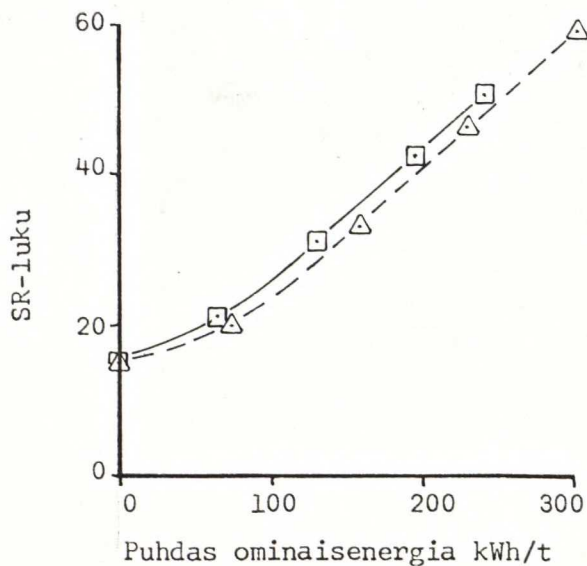


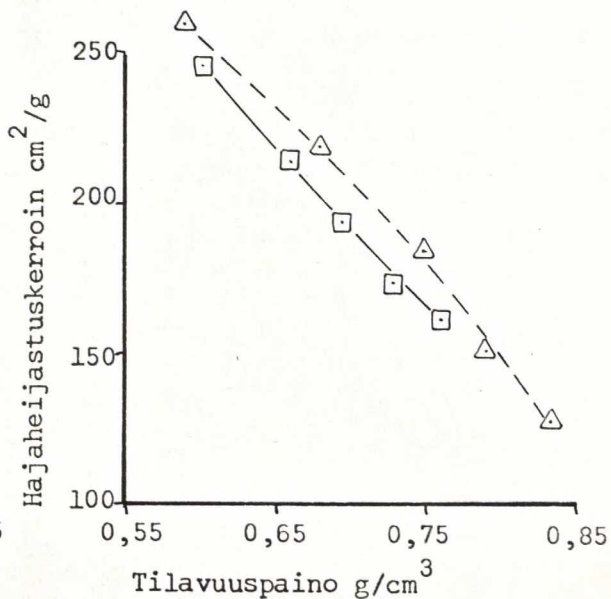
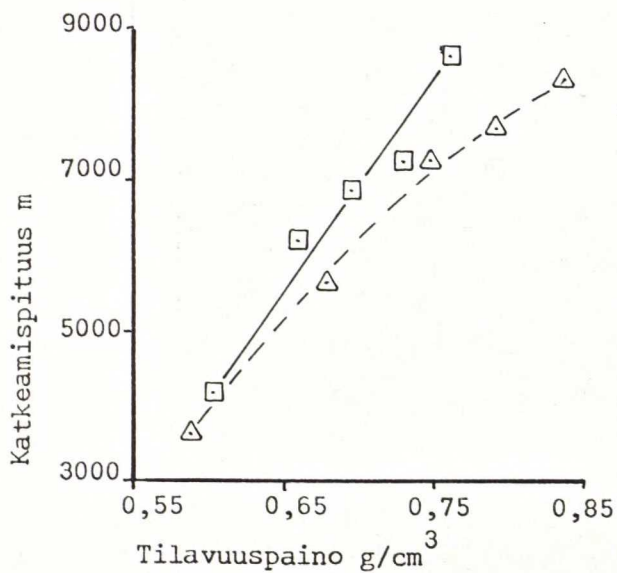
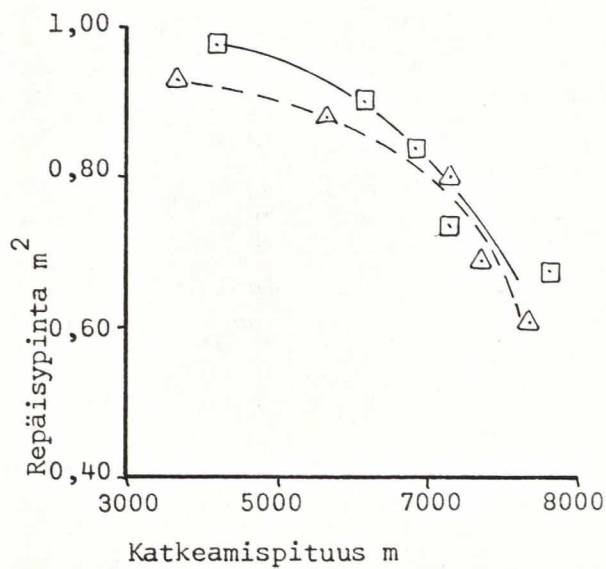
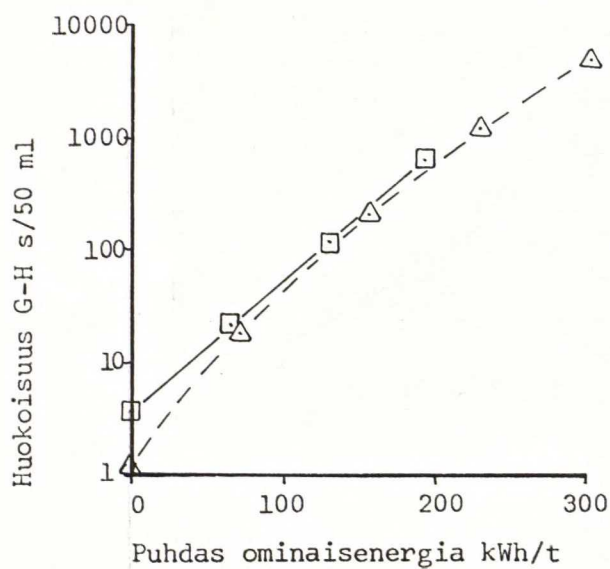
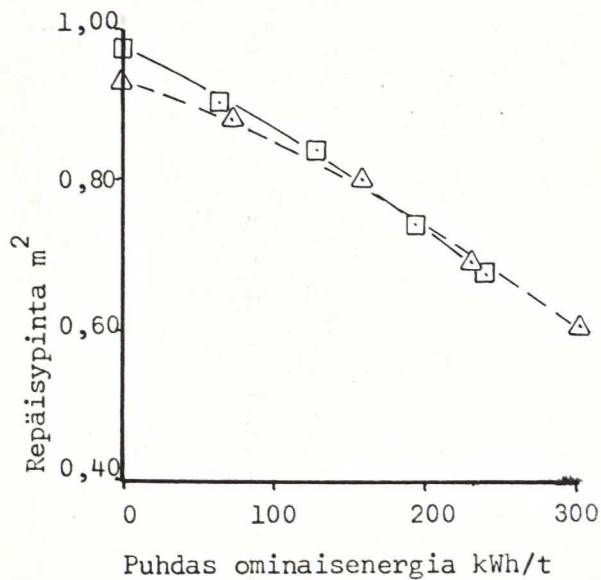
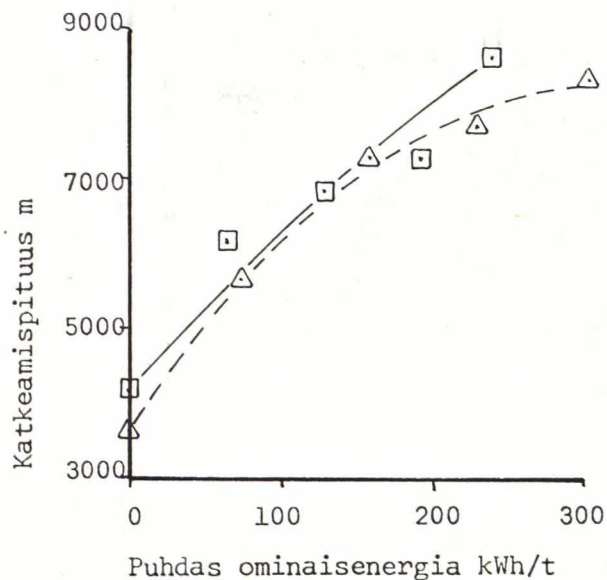


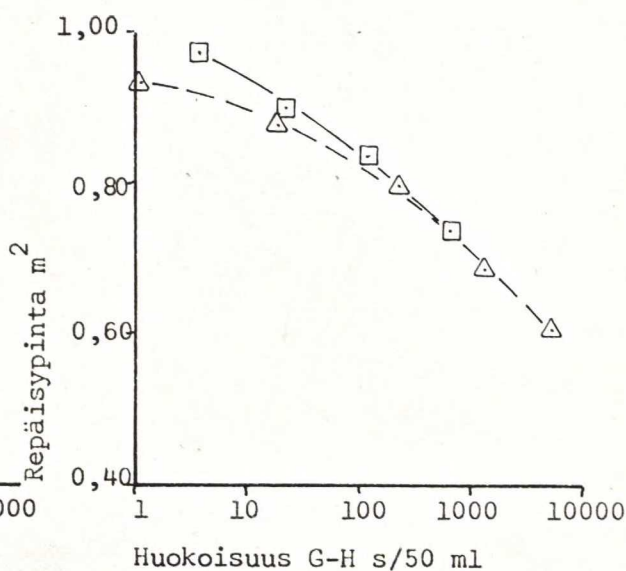
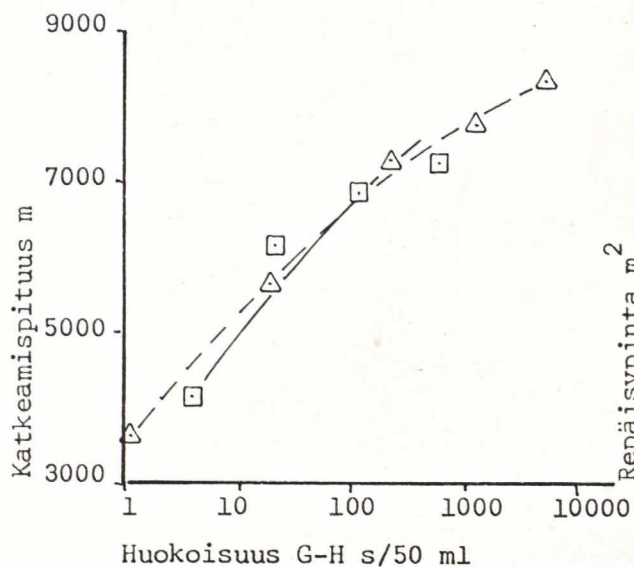
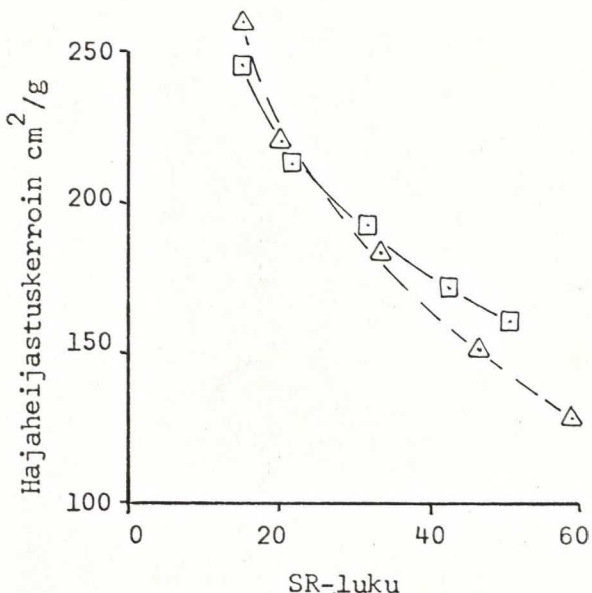
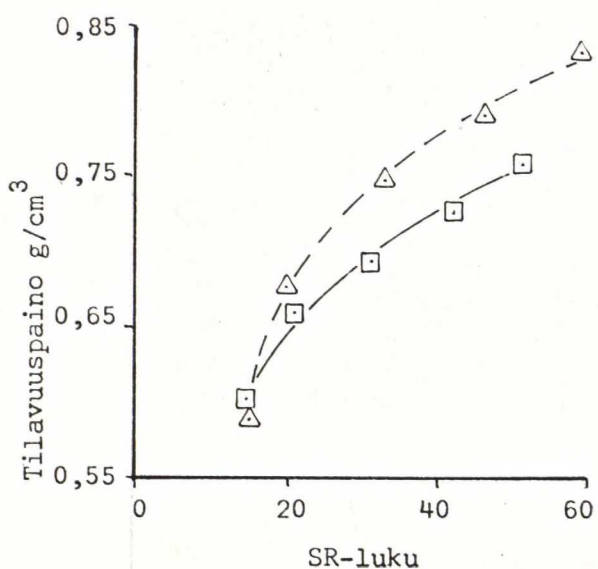
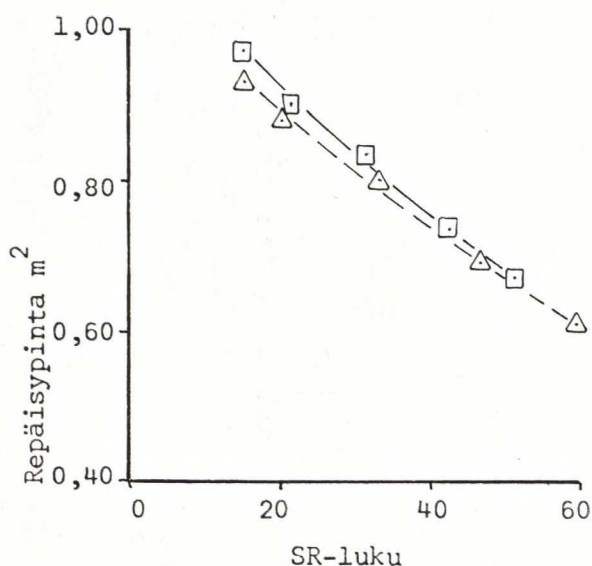
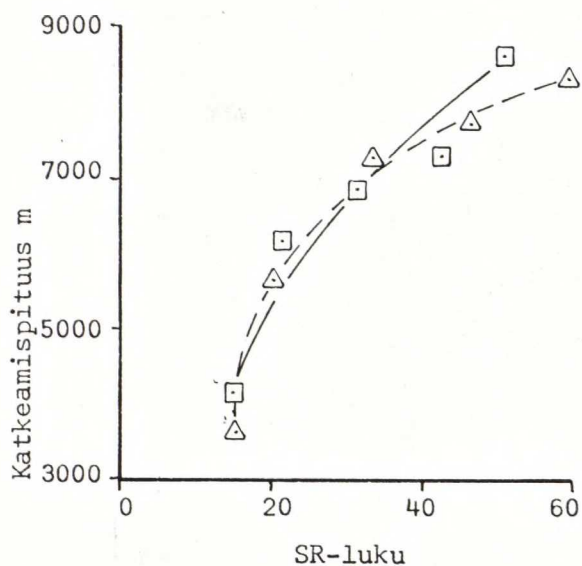
Jauhatussakeuden muutos

△ Koepiste 2. 2,8 % 1050 Ws/km 850 r/min 500 l/min

□ Koepiste 6. 3,6 % 1040 Ws/km 850 r/min 500 l/min



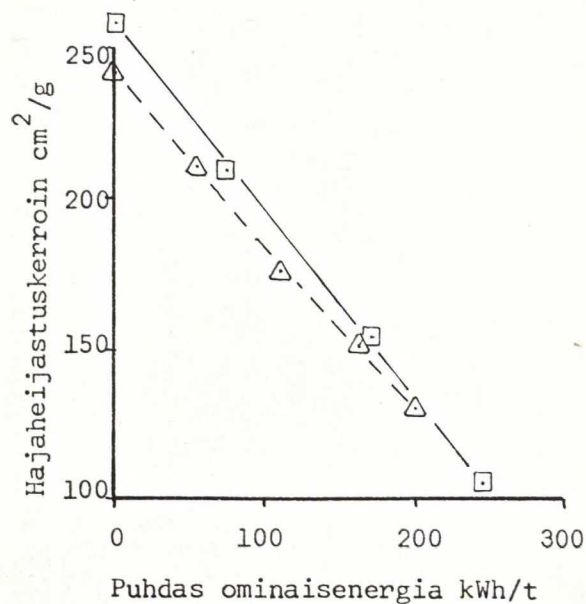
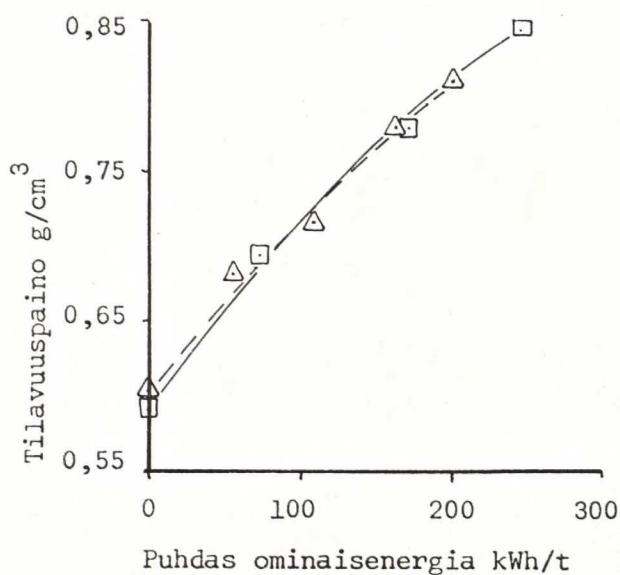
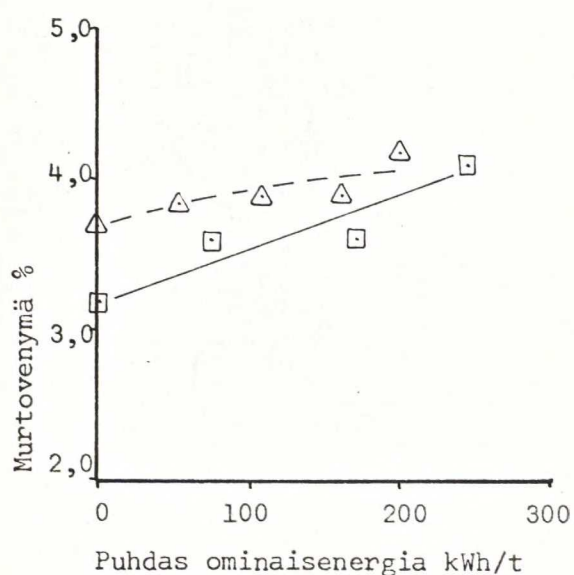
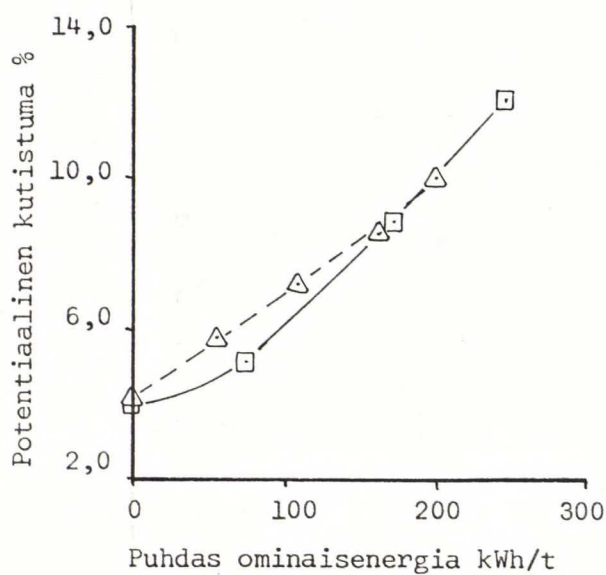
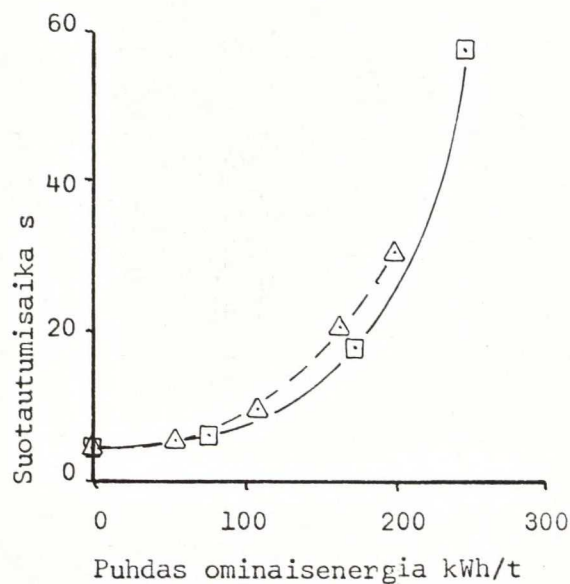
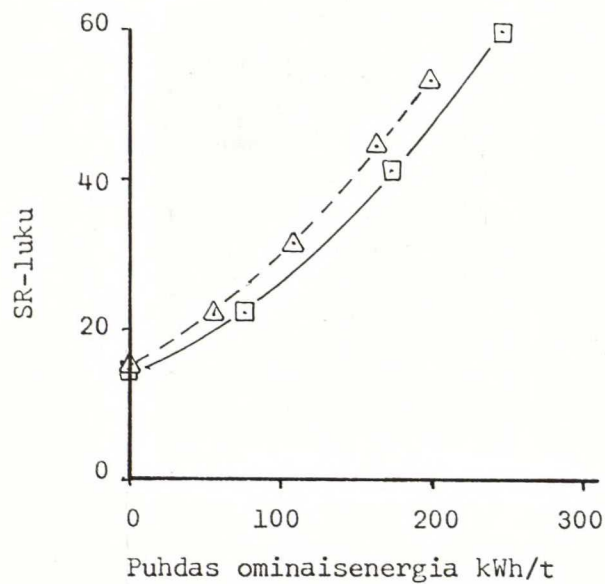


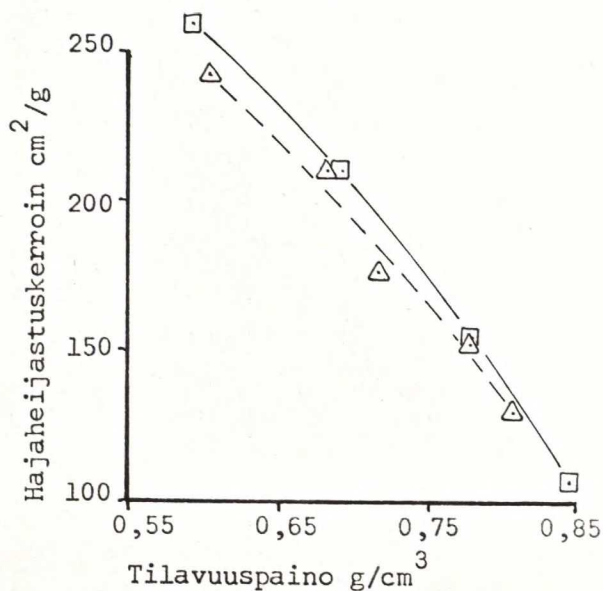
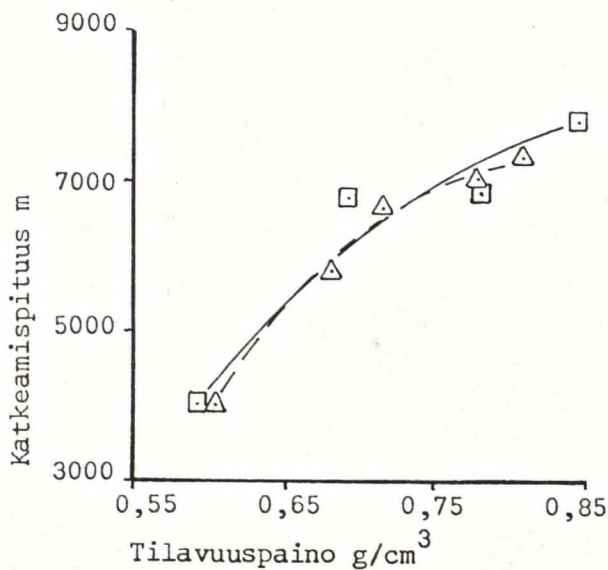
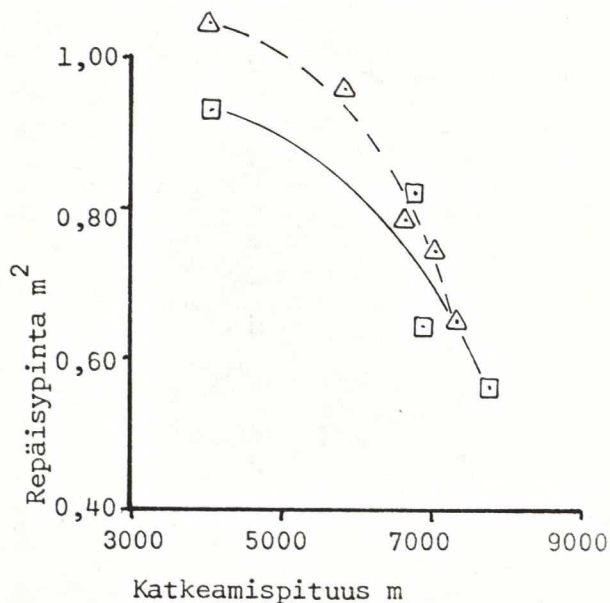
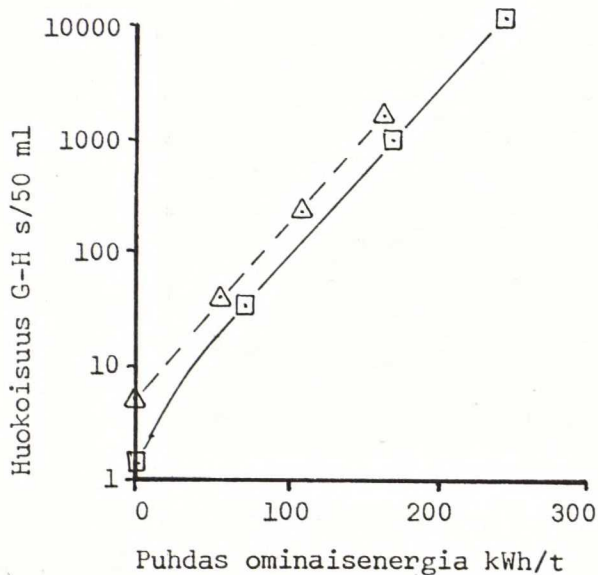
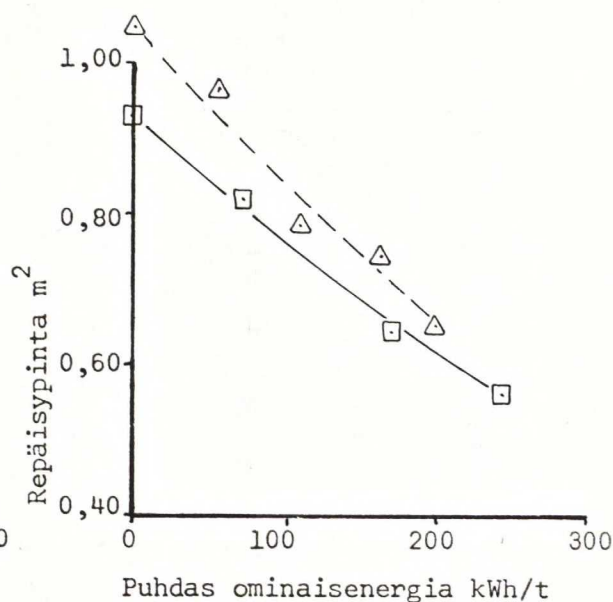
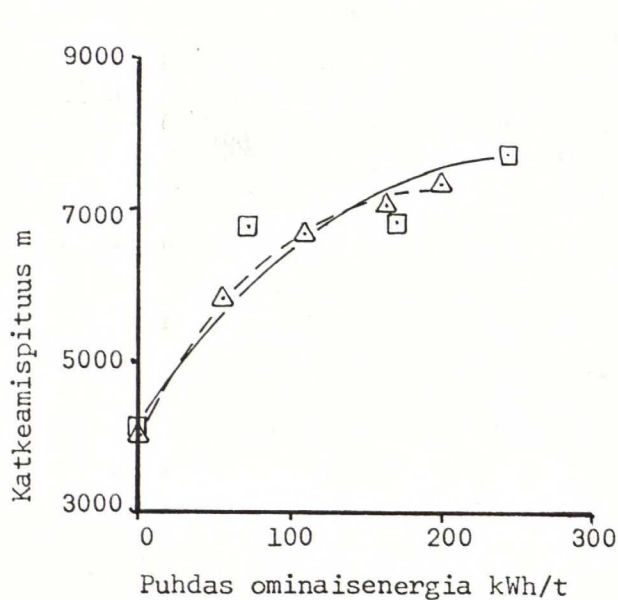


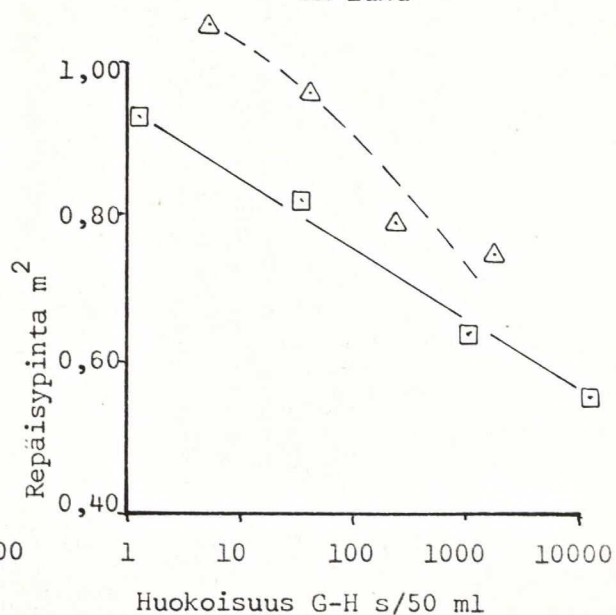
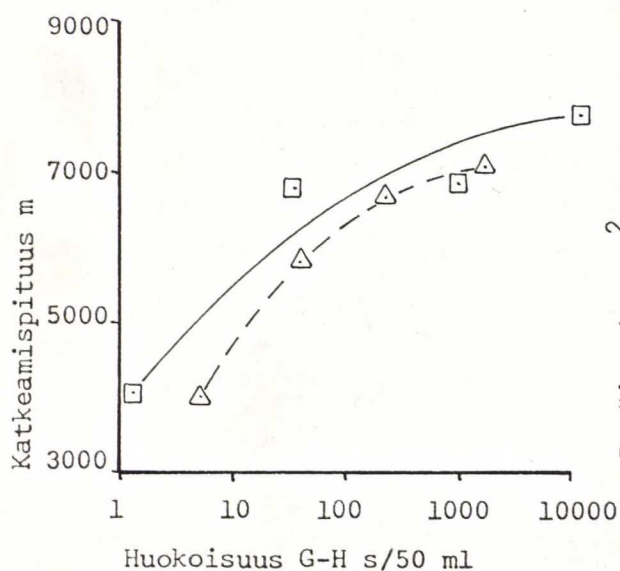
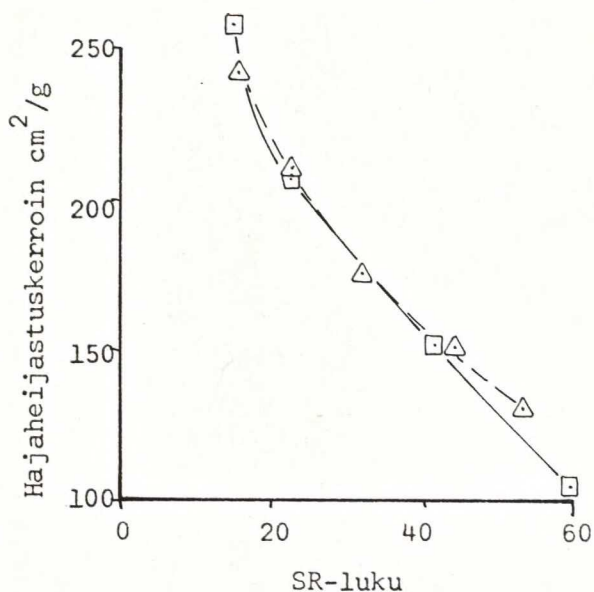
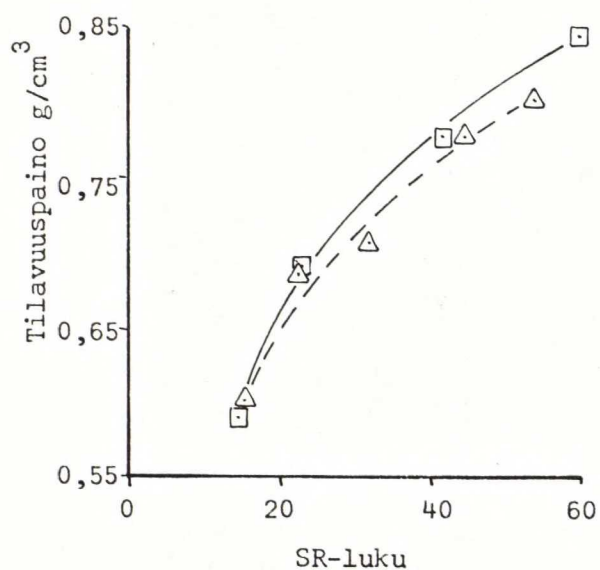
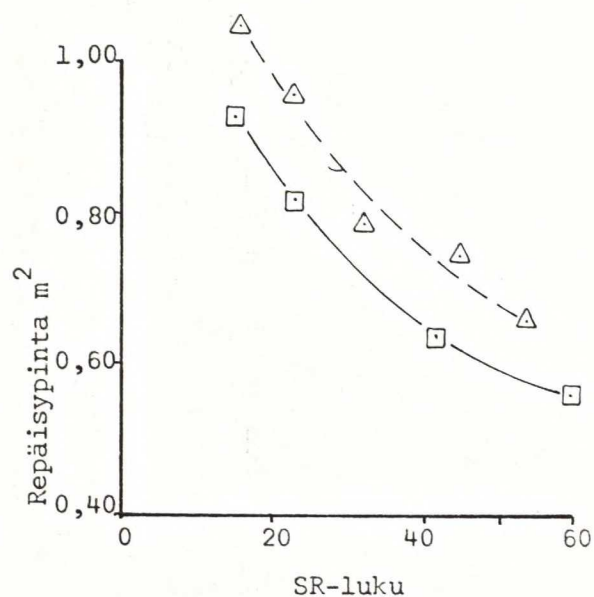
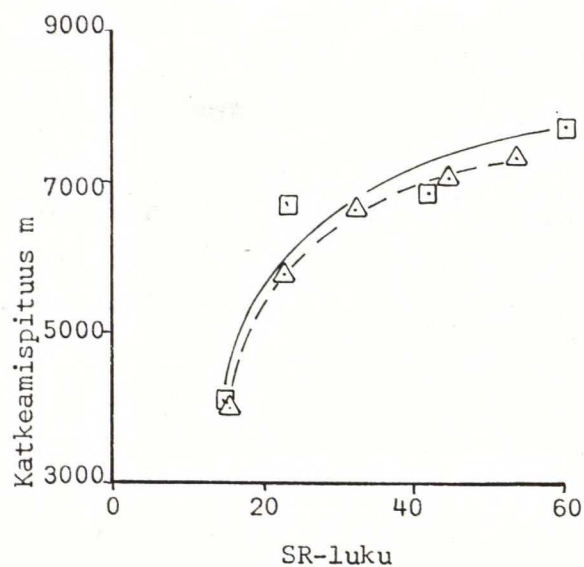
Jauhatussakeuden muutos

□ Koepiste 3. 2,7 % 2020 Ws/km 850 r/min 500 l/min

△ Koepiste 7. 3,7 % 2010 Ws/km 850 r/min 500 l/min



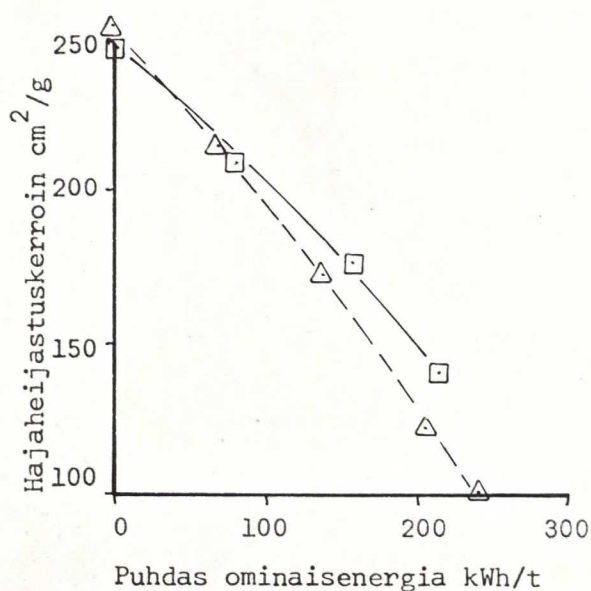
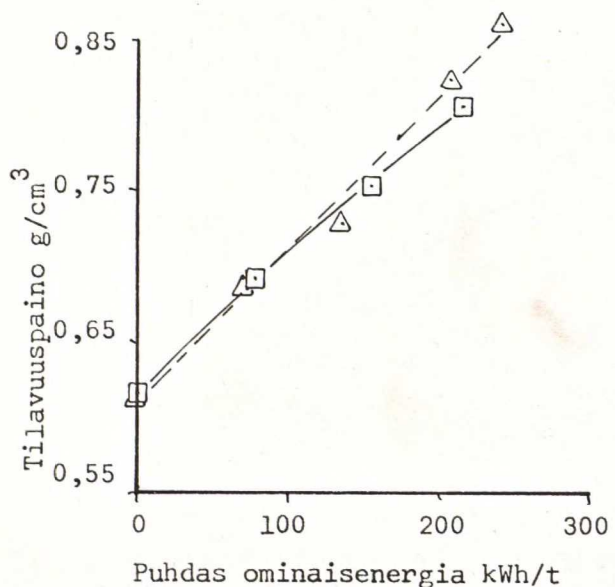
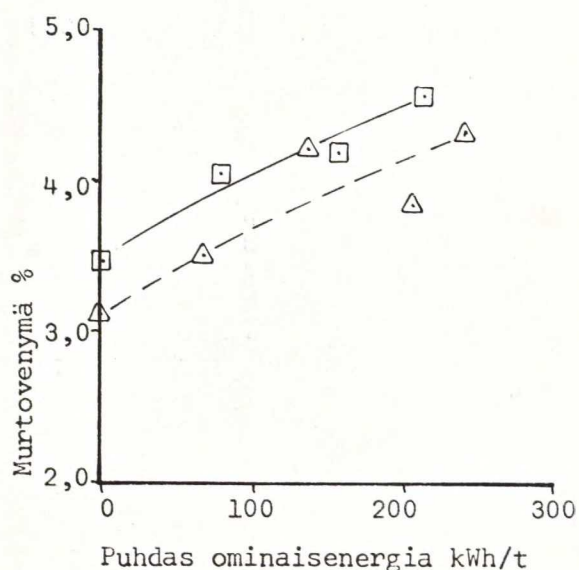
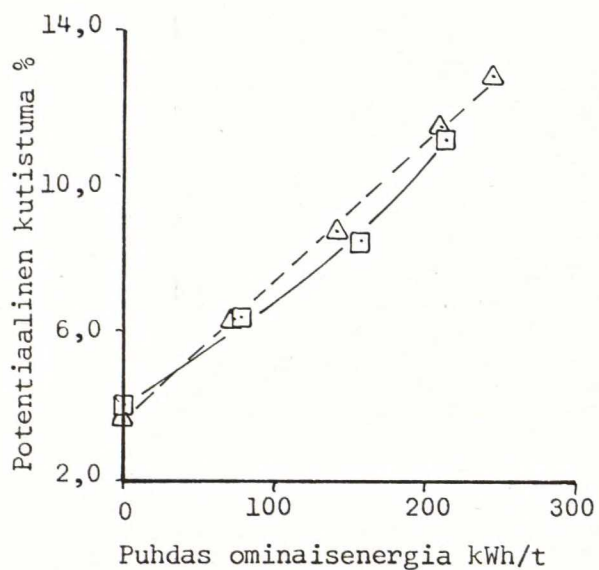
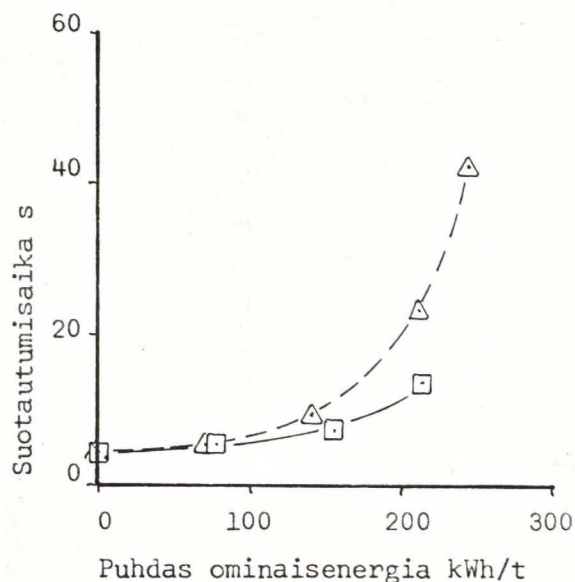
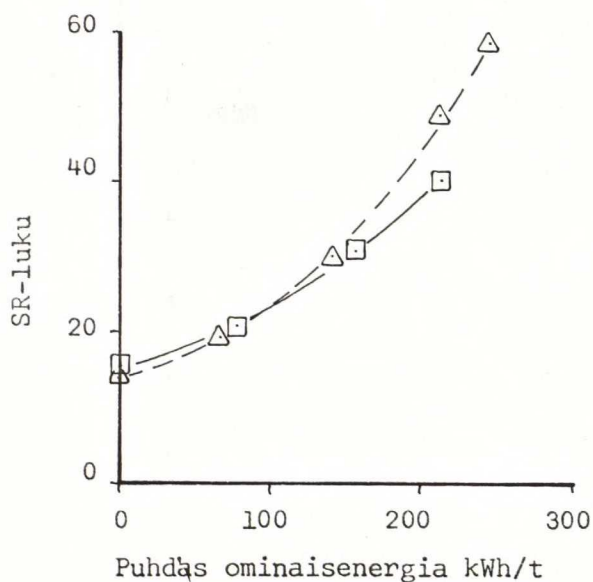


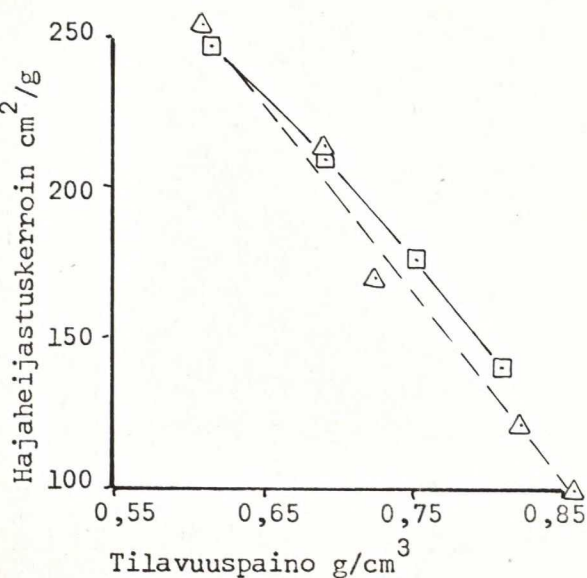
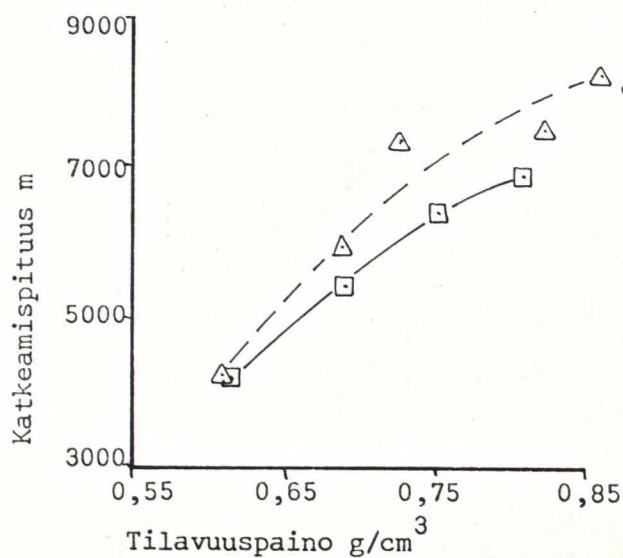
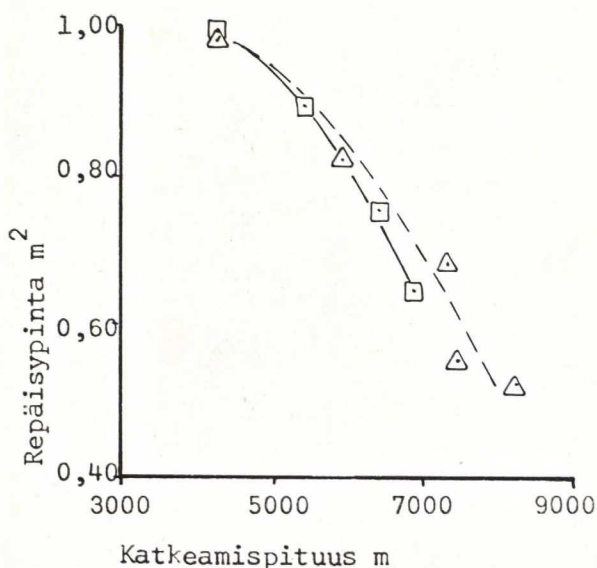
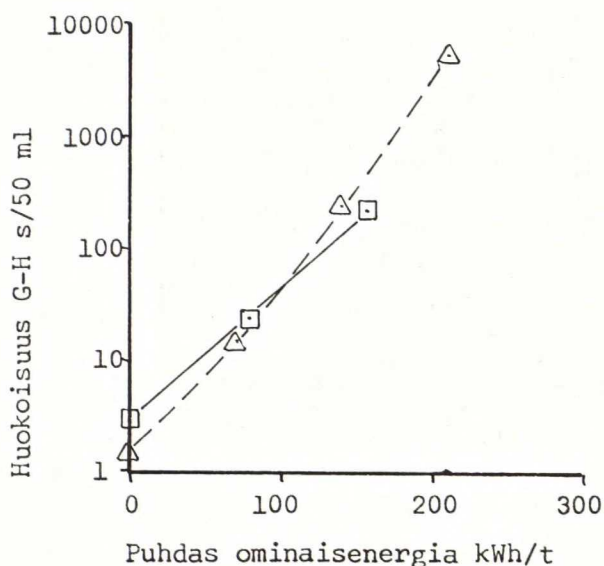
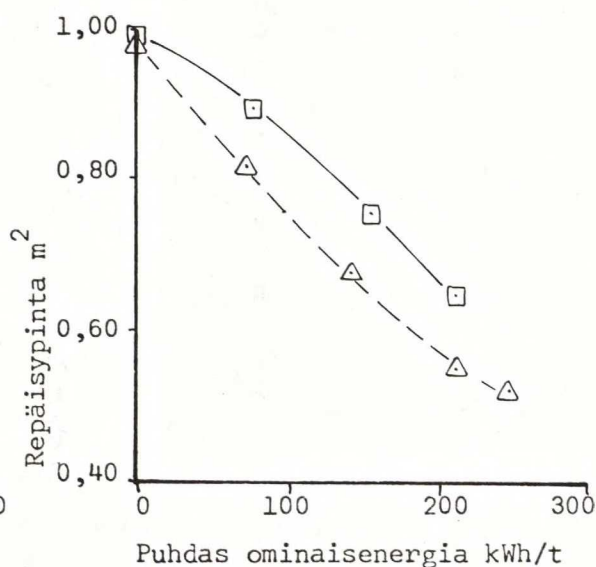
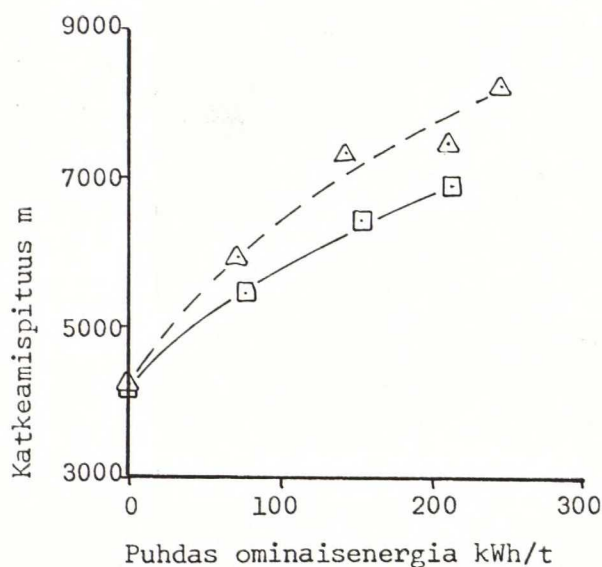


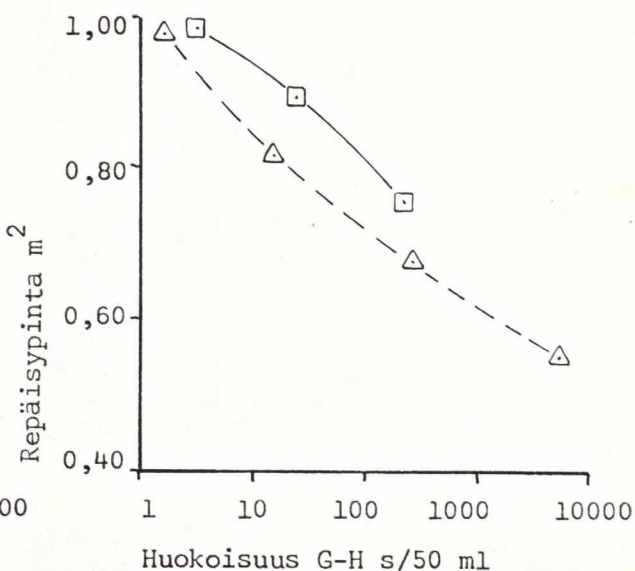
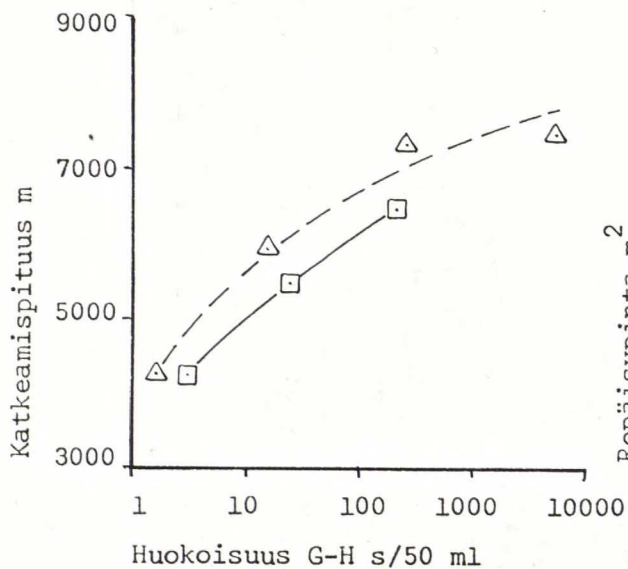
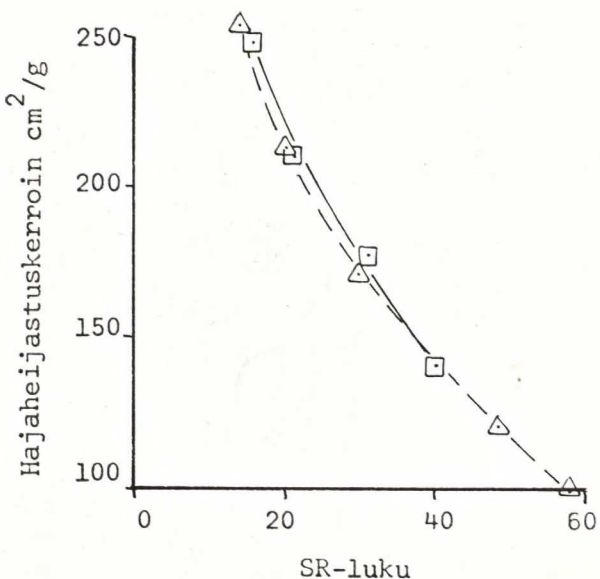
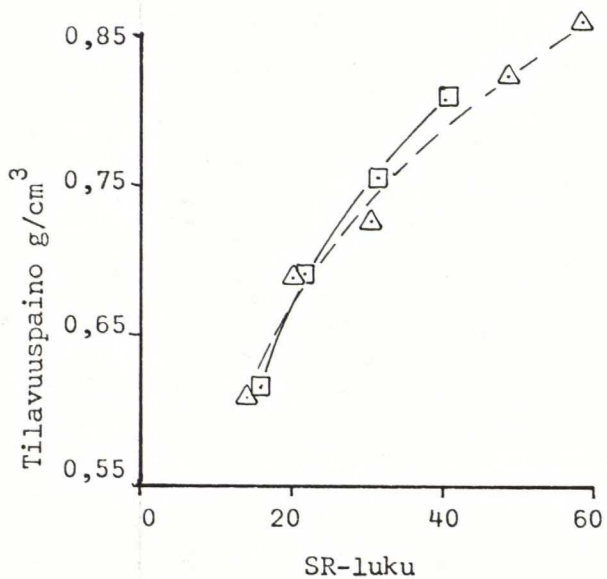
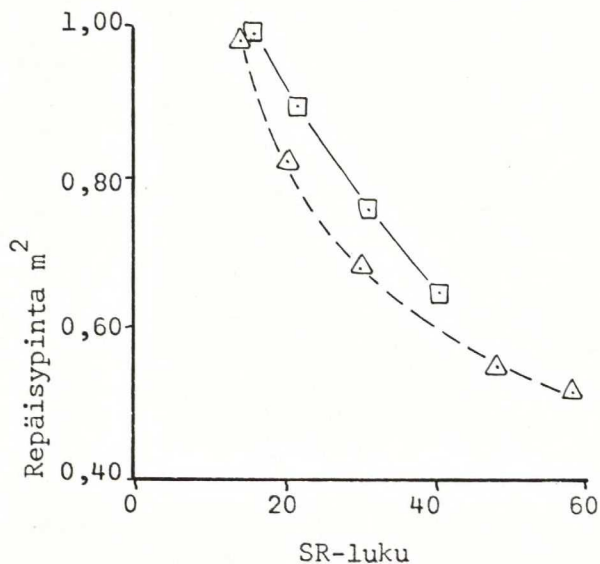
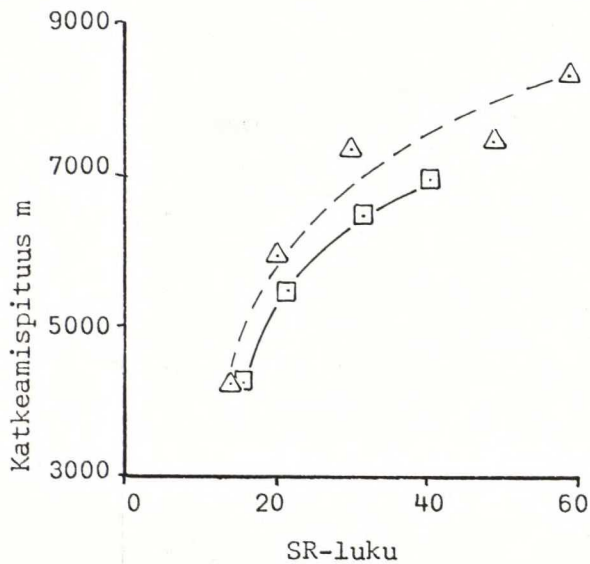
Jauhatussakeuden muutos

△ Koepiste 4. 3,0 % 2015 Ws/km 450 r/min 500 l/min

□ Koepiste 8. 3,7 % 2035 Ws/km 450 r/min 500 l/min



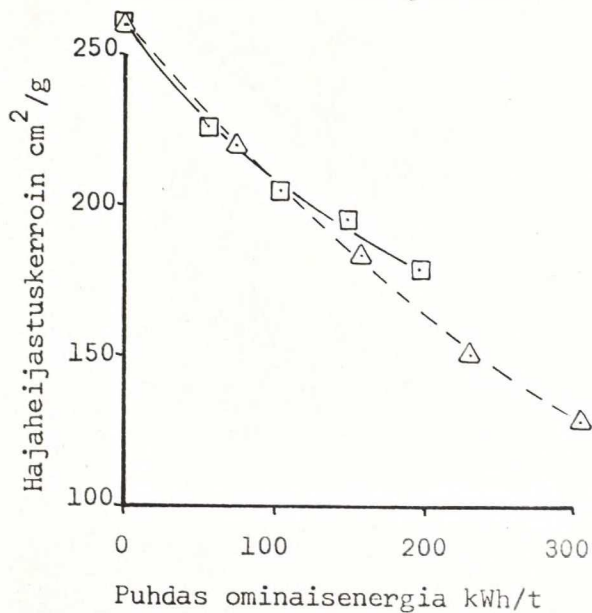
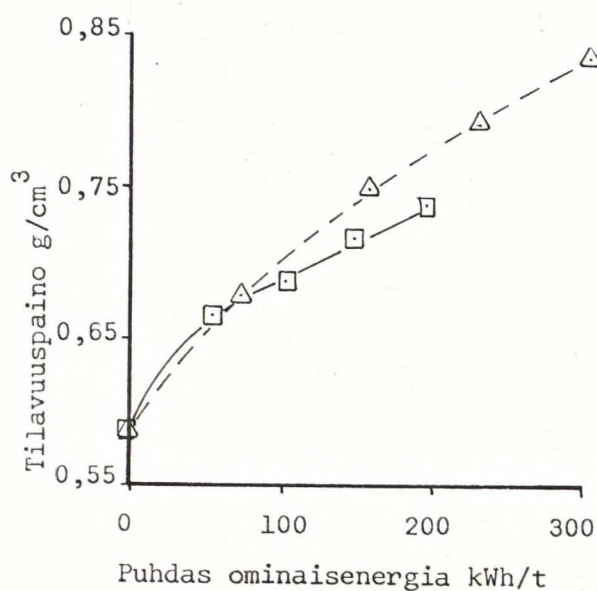
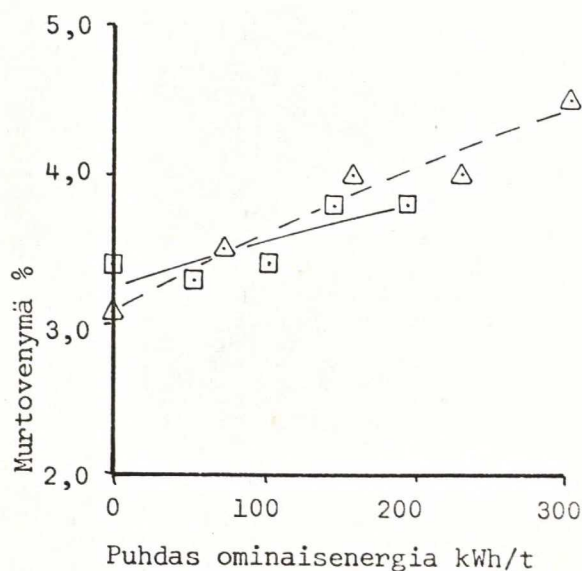
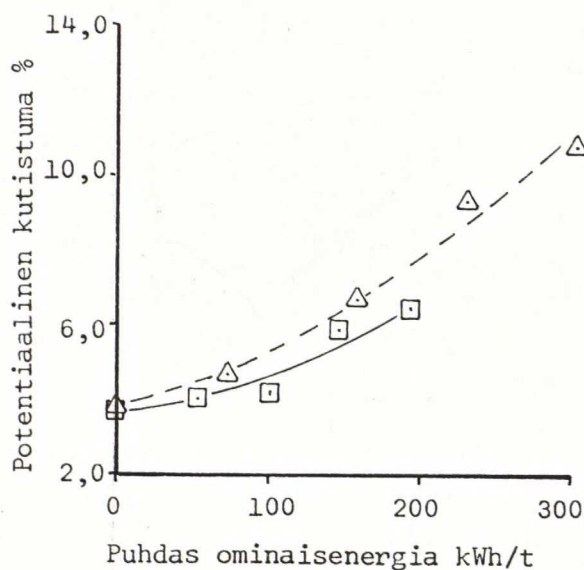
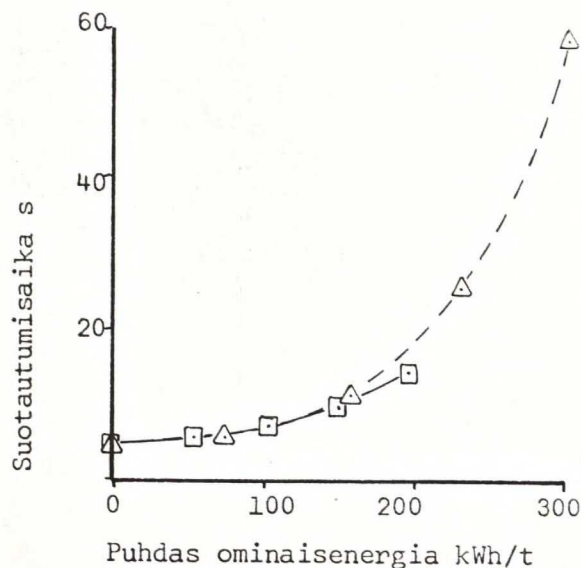
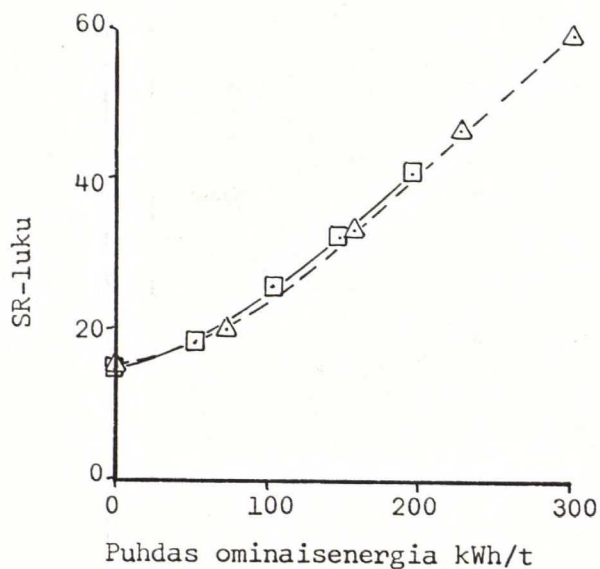


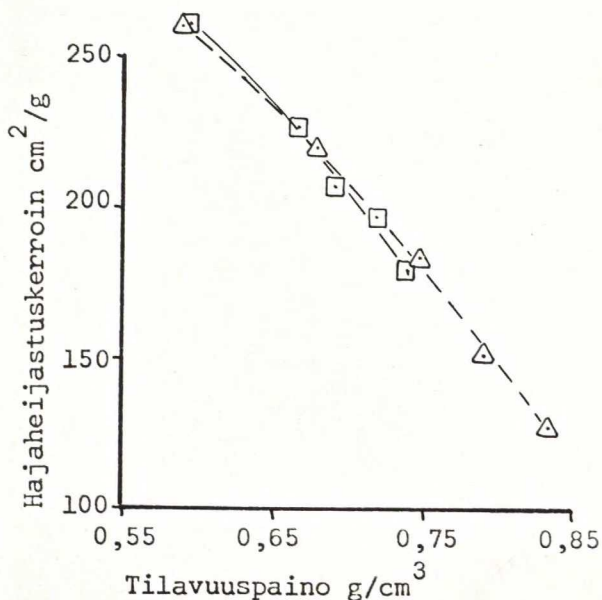
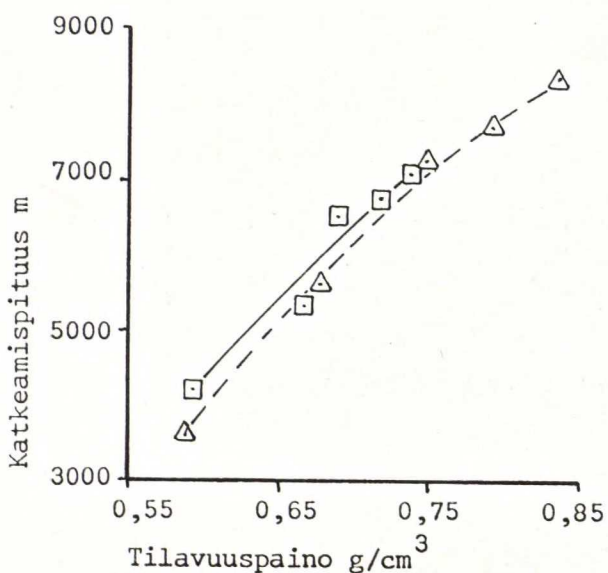
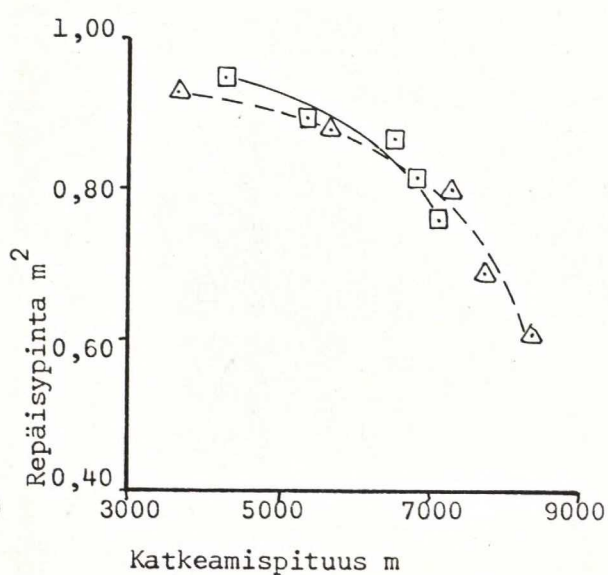
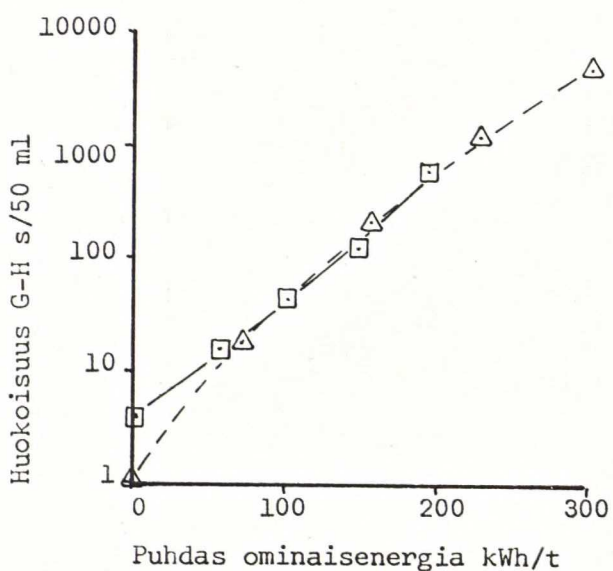
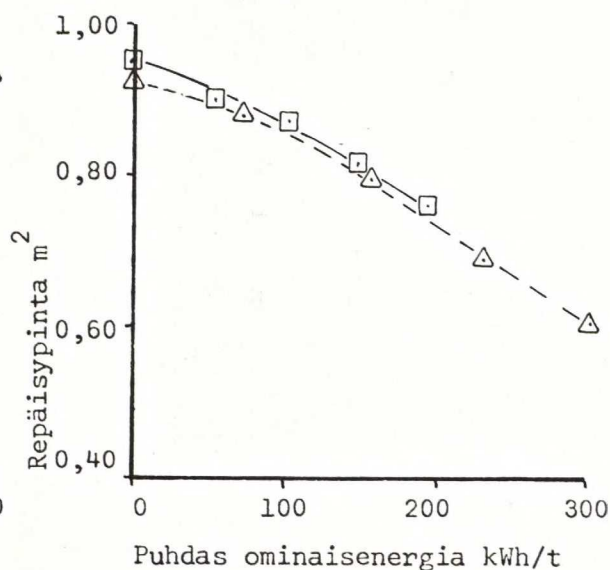
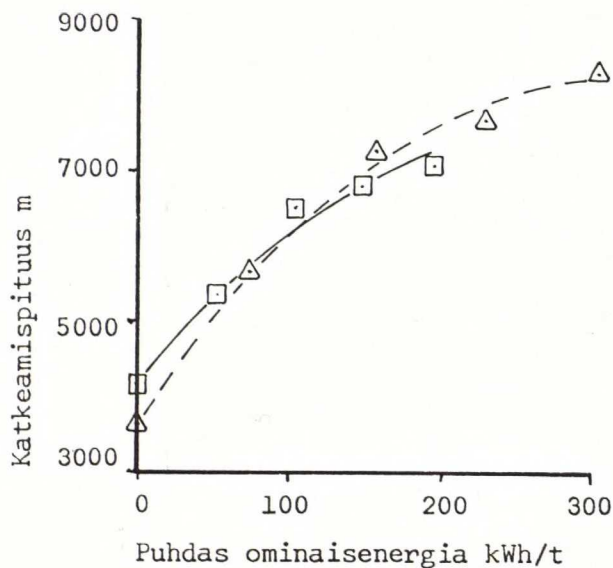


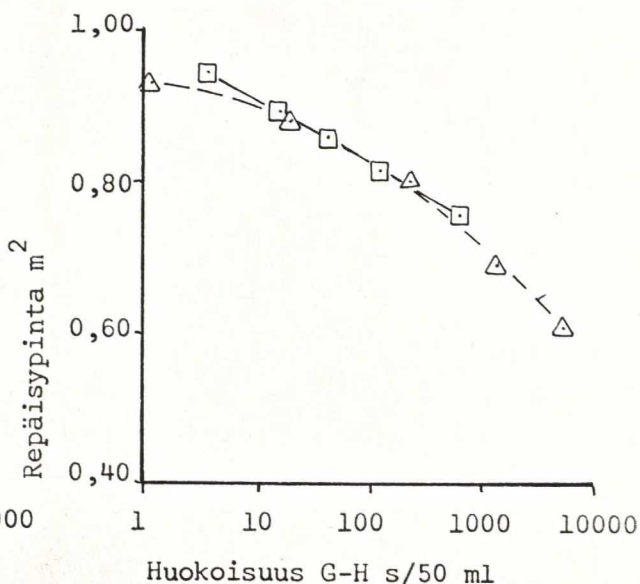
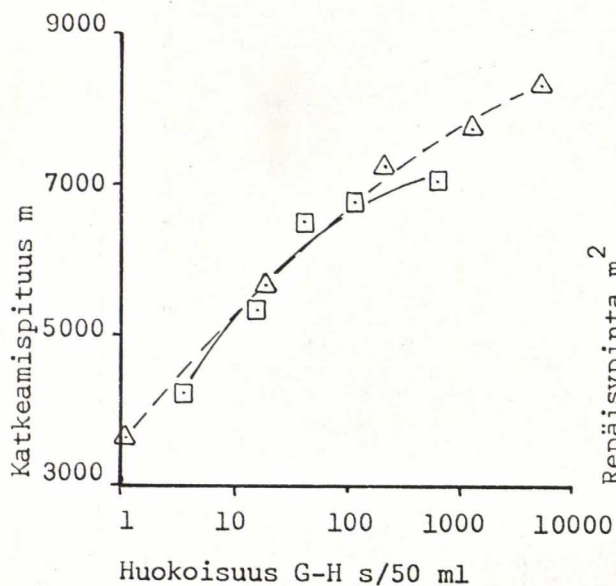
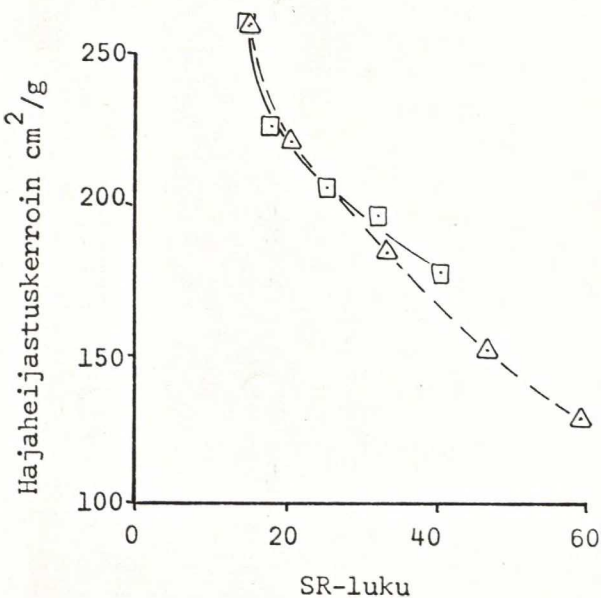
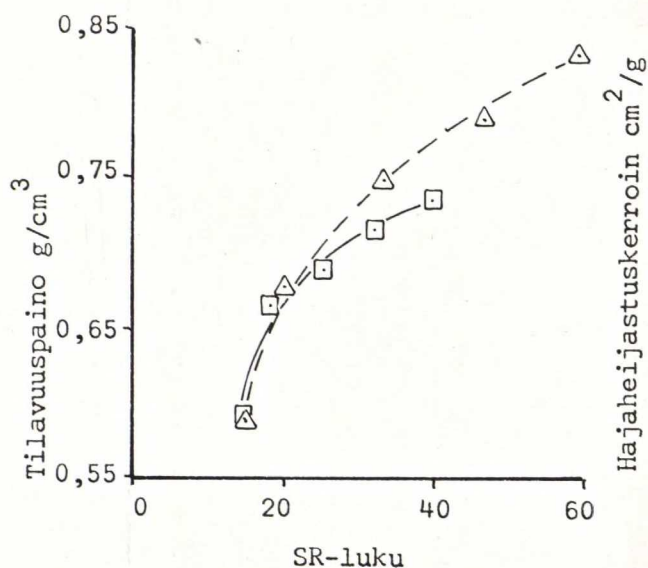
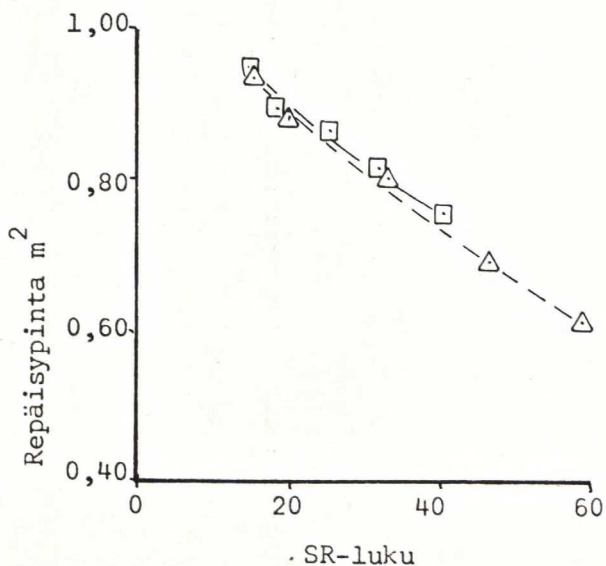
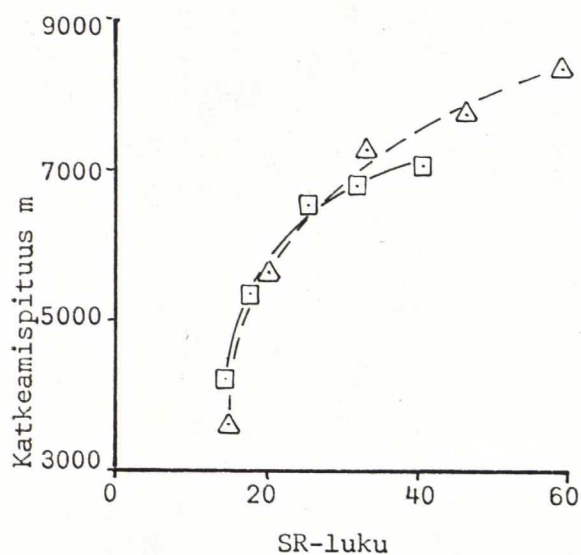
Tilavuusvirtauksen muutos

□ Koepiste 9. 350 l/min 1020 Ws/km 850 r/min 3,0 %

△ Koepiste 2. 500 l/min 1050 Ws/km 850 r/min 2,8 %



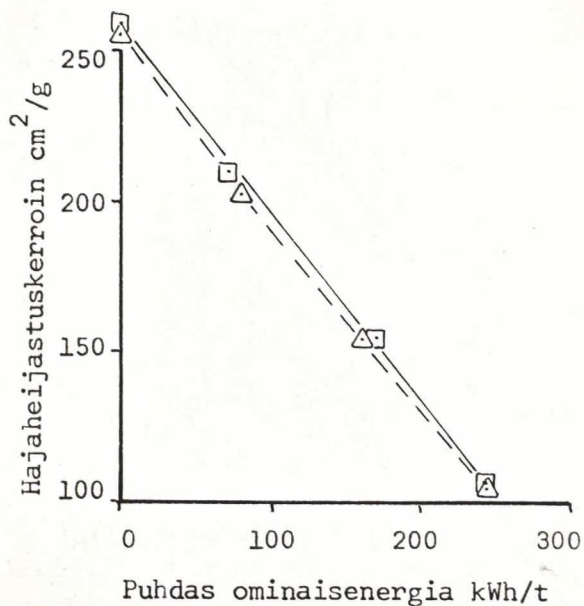
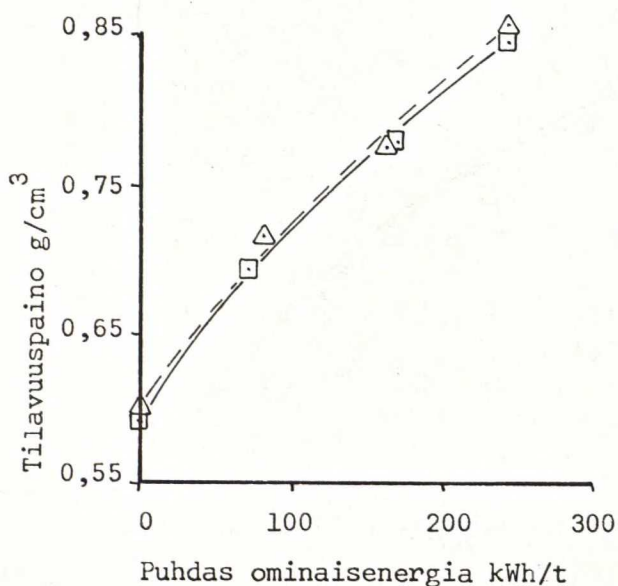
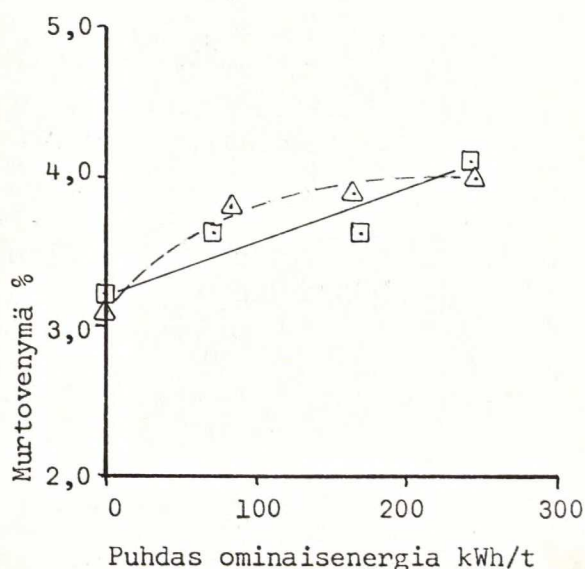
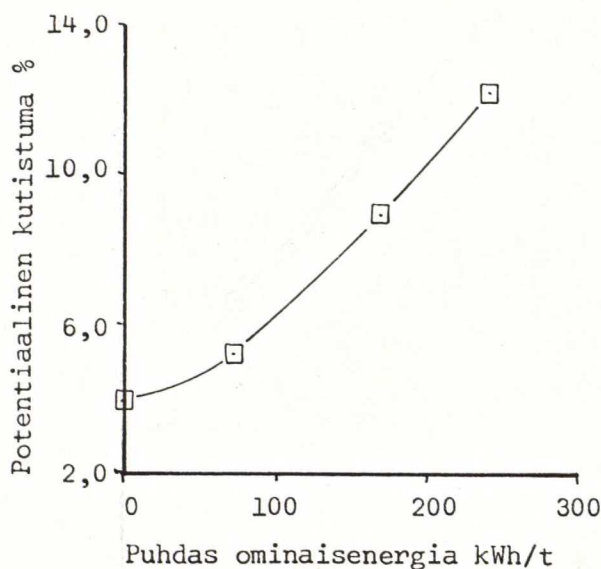
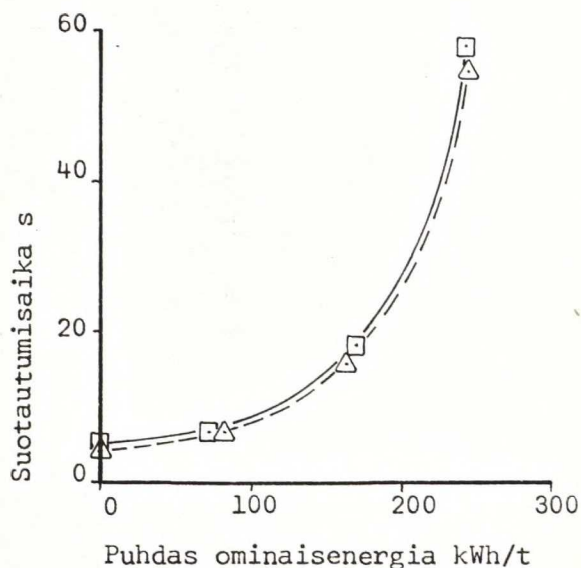
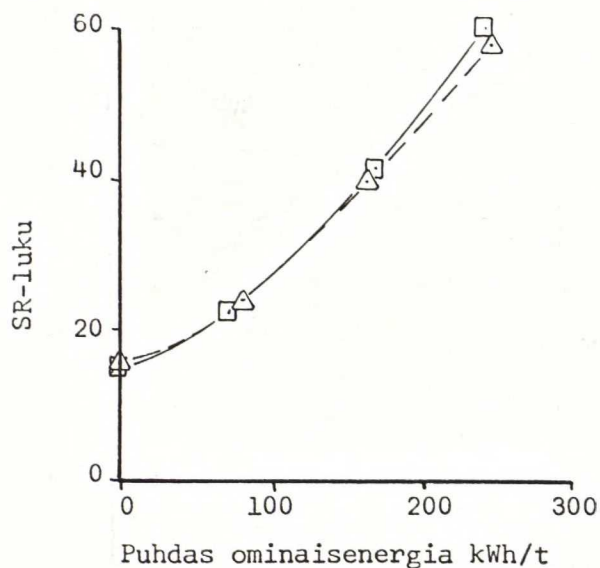


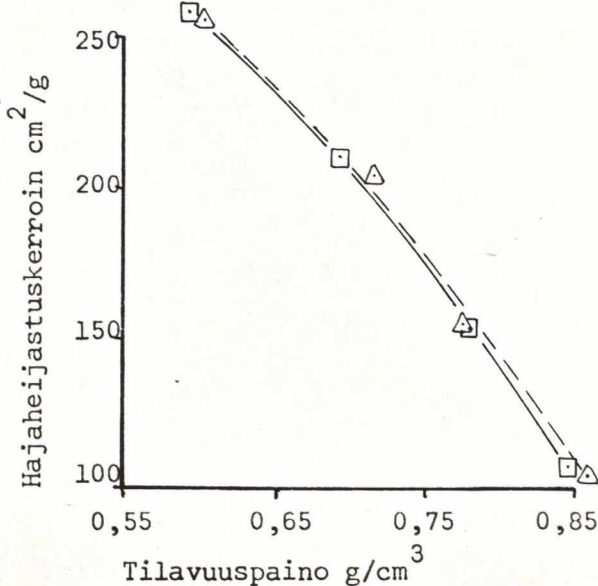
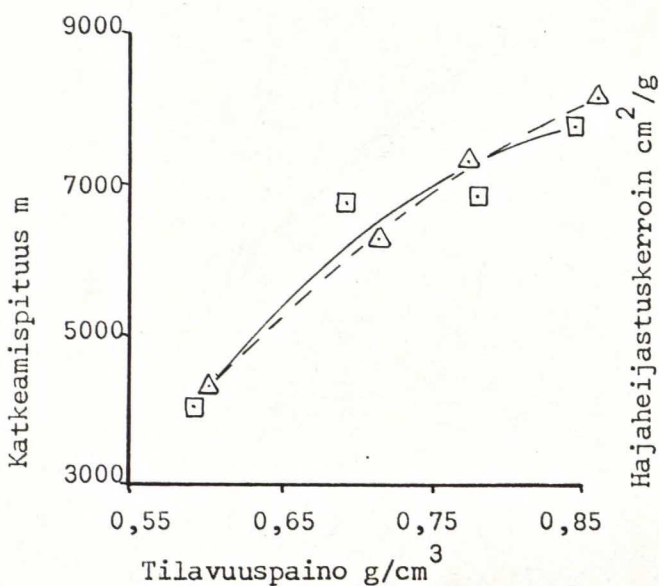
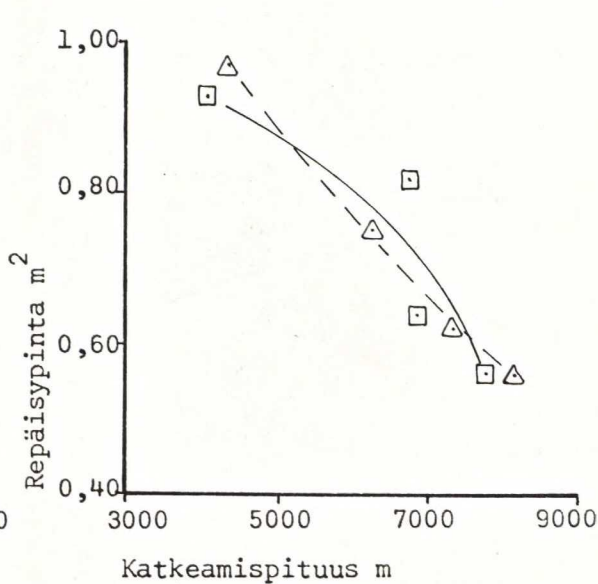
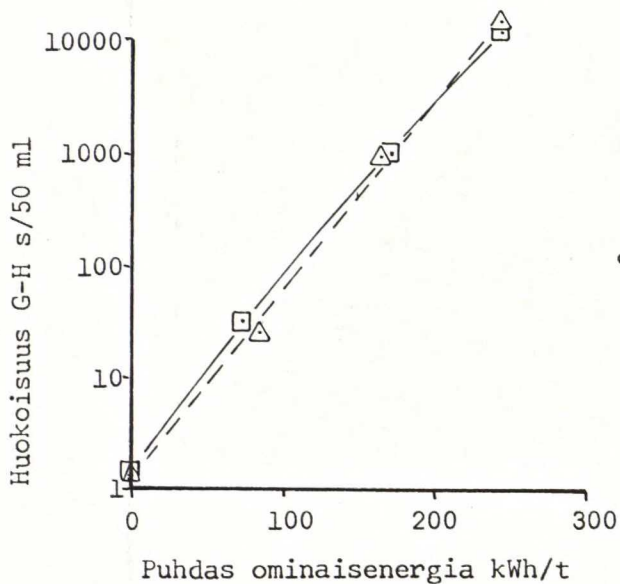
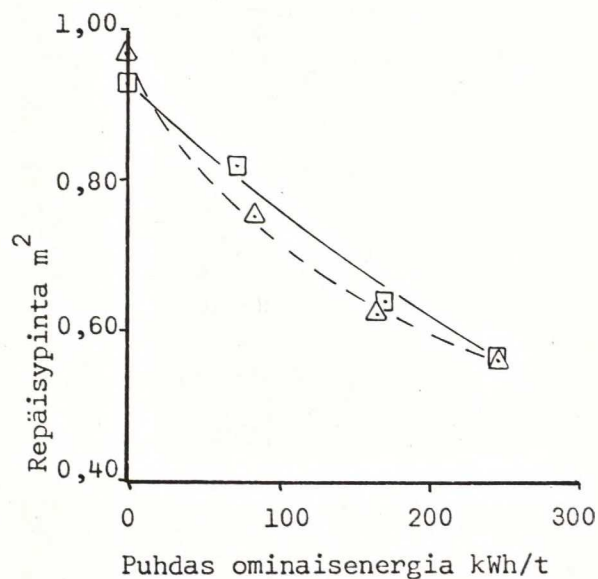
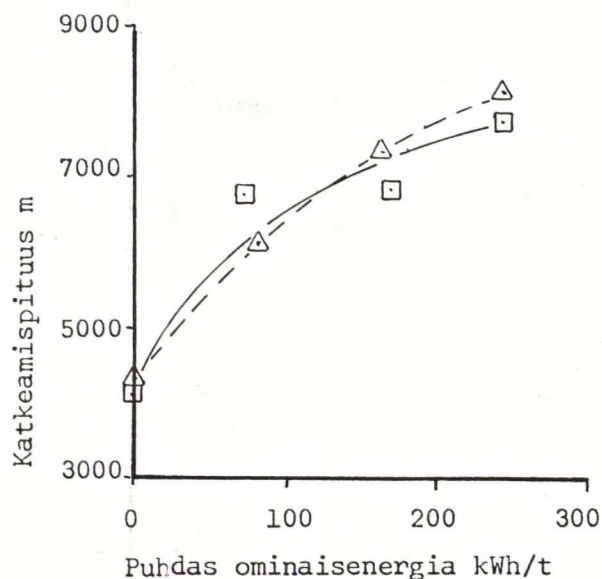


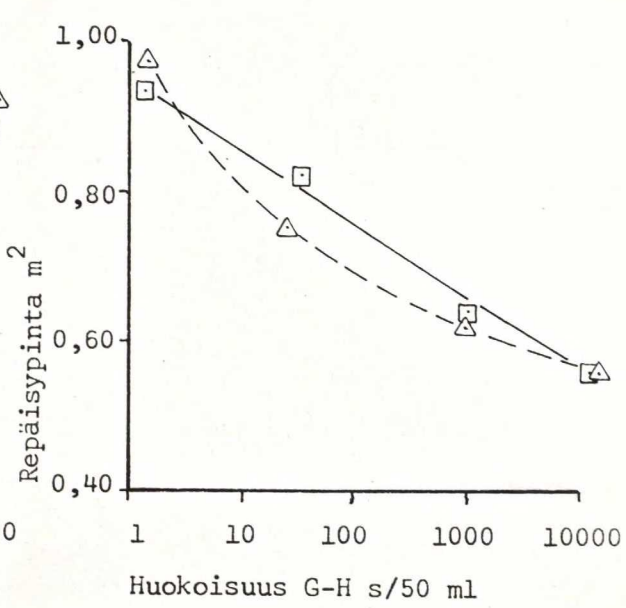
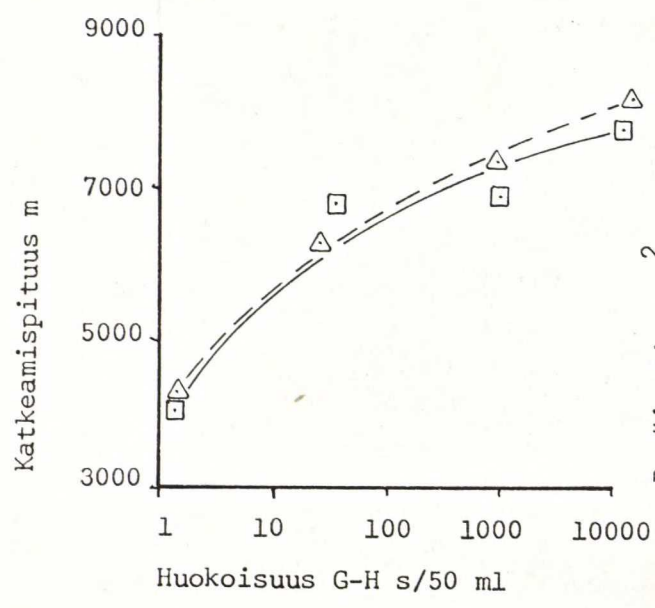
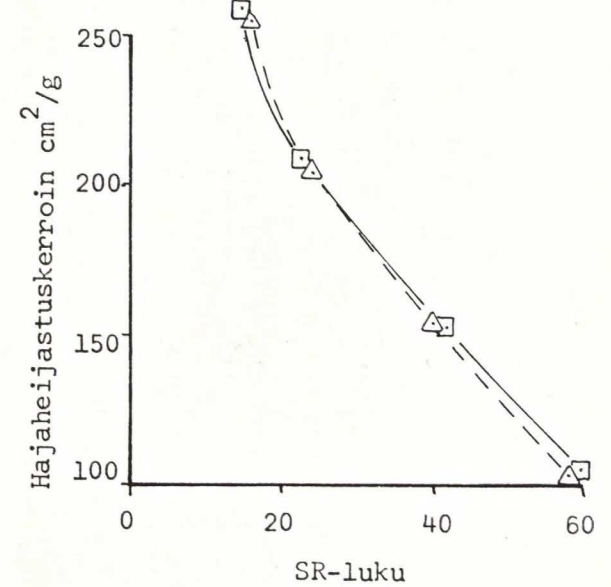
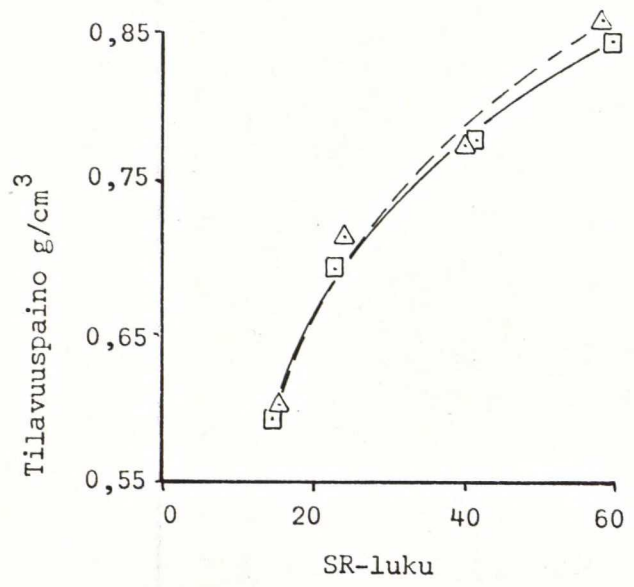
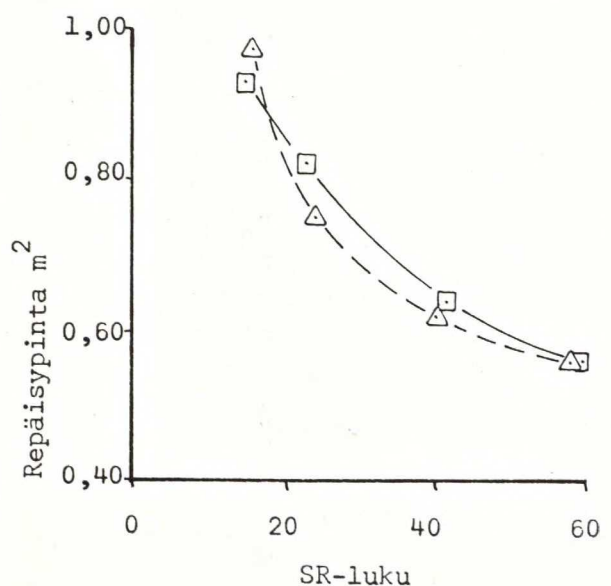
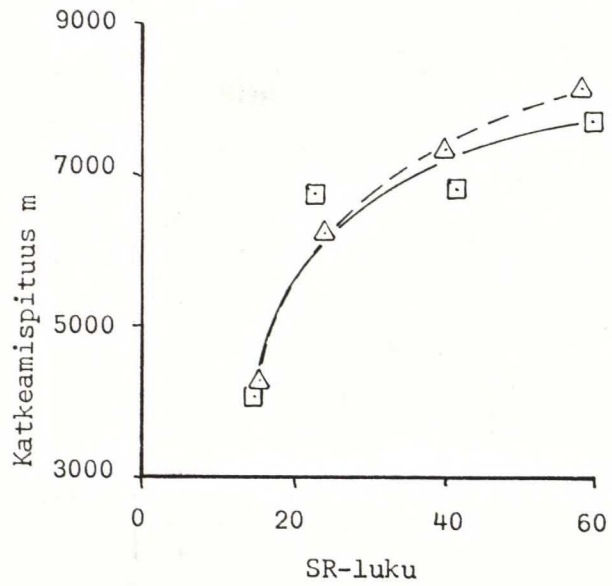
Tilavuusvirtauksen muutos

△ Koepiste 10. 350 l/min 1970 Ws/km 850 r/min 2,6 %

□ Koepiste 3. 500 l/min 2020 Ws/km 850 r/min 2,7 %



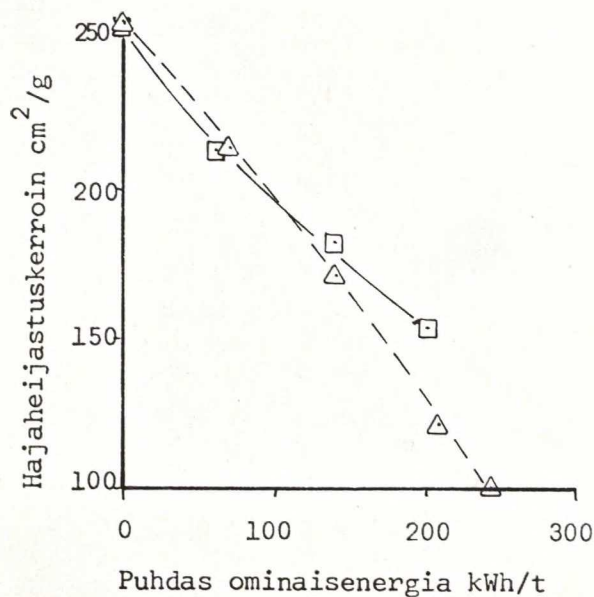
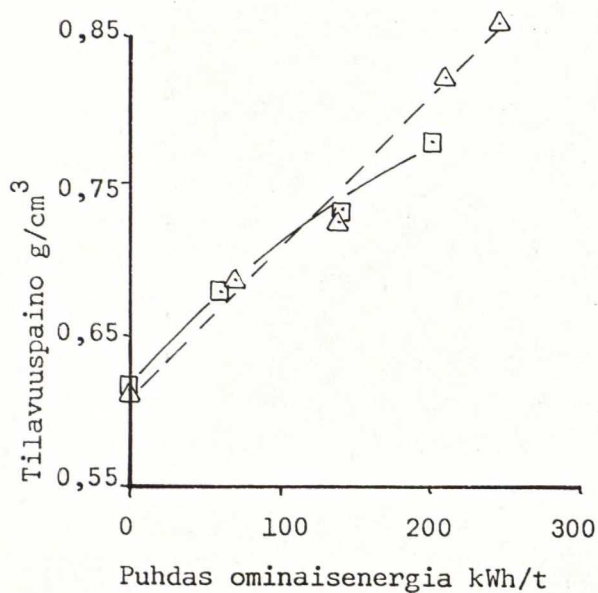
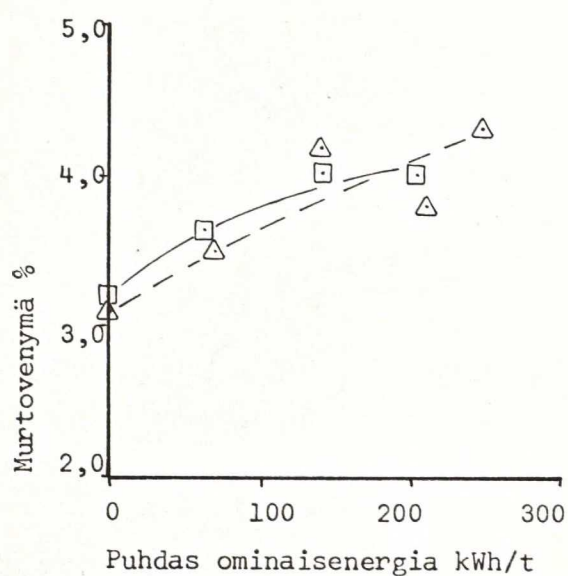
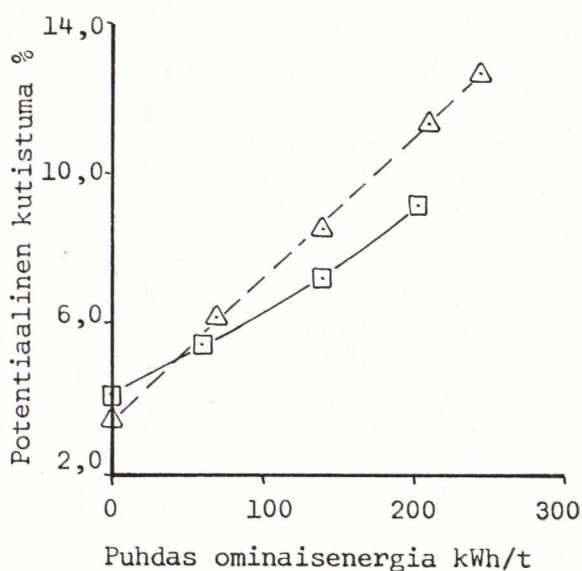
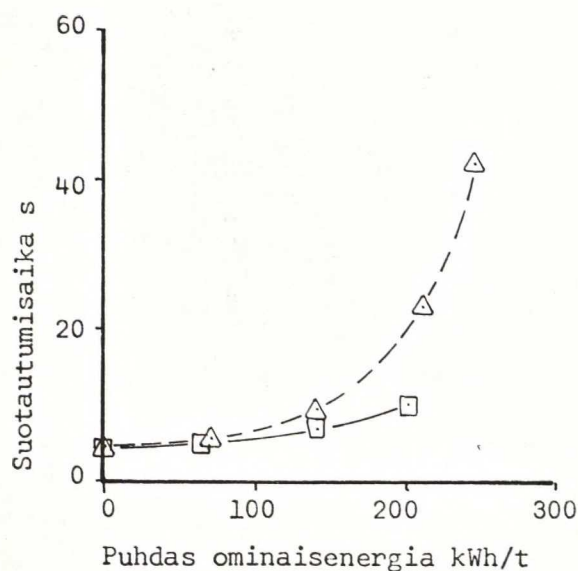
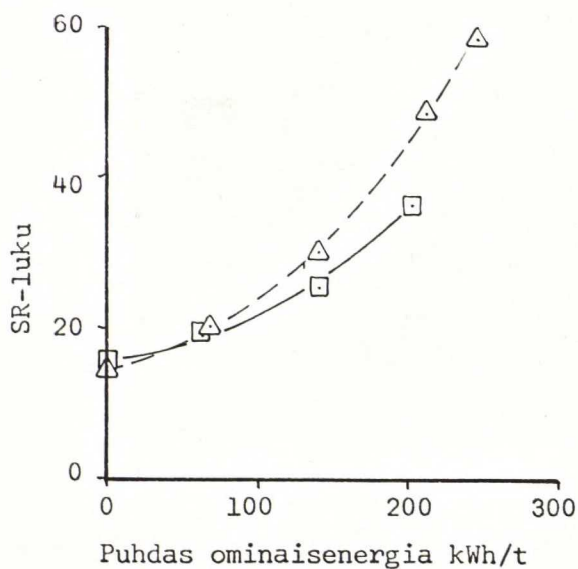


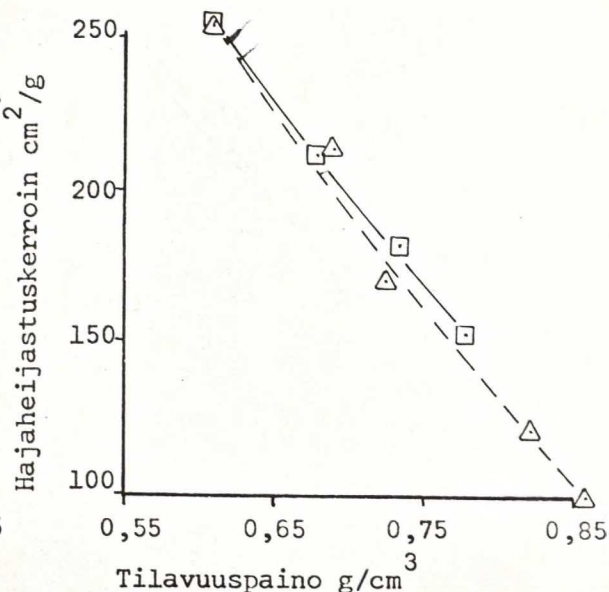
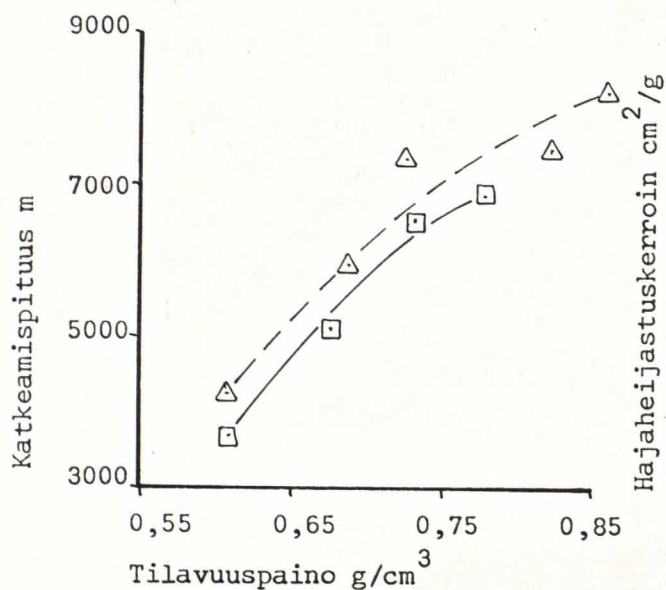
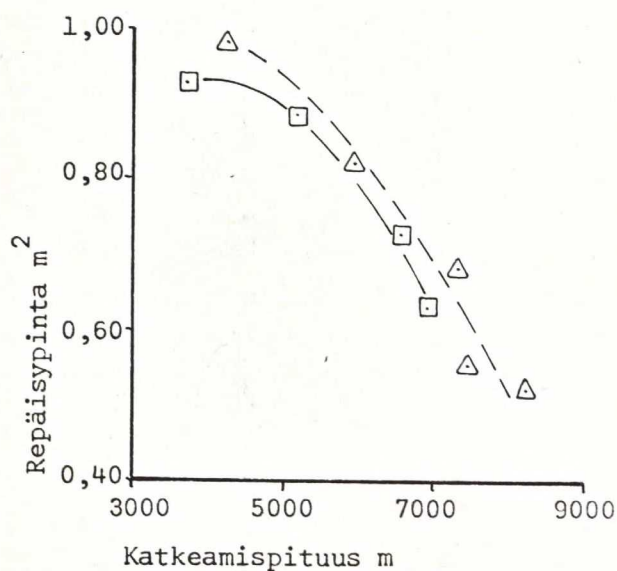
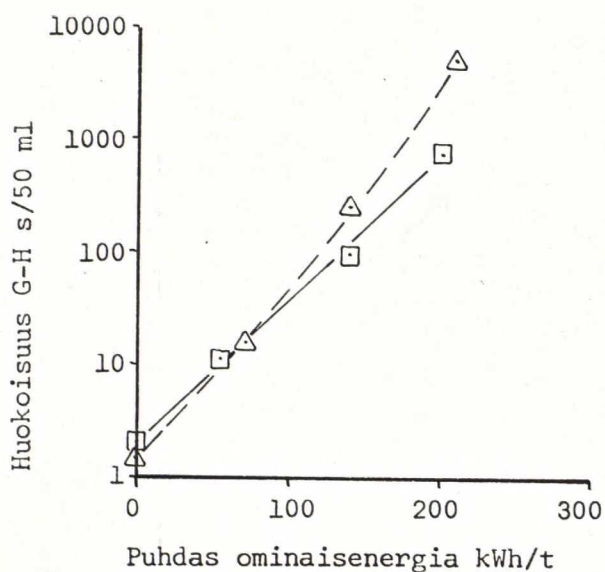
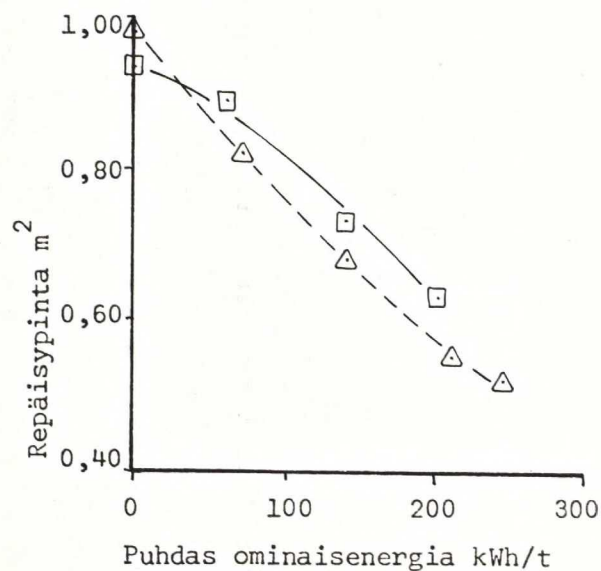
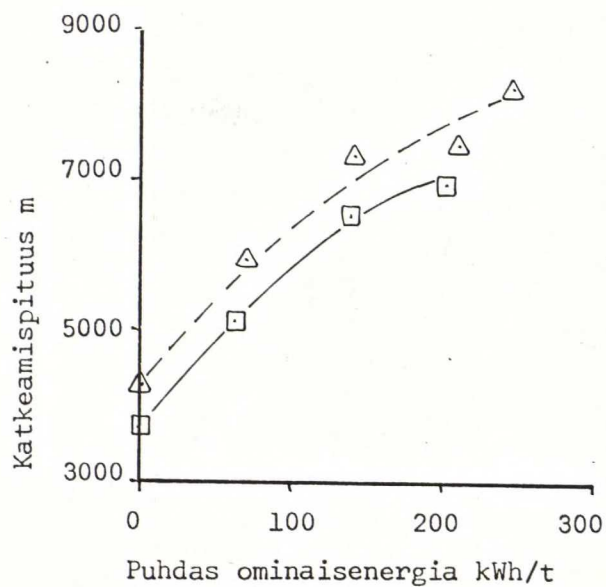


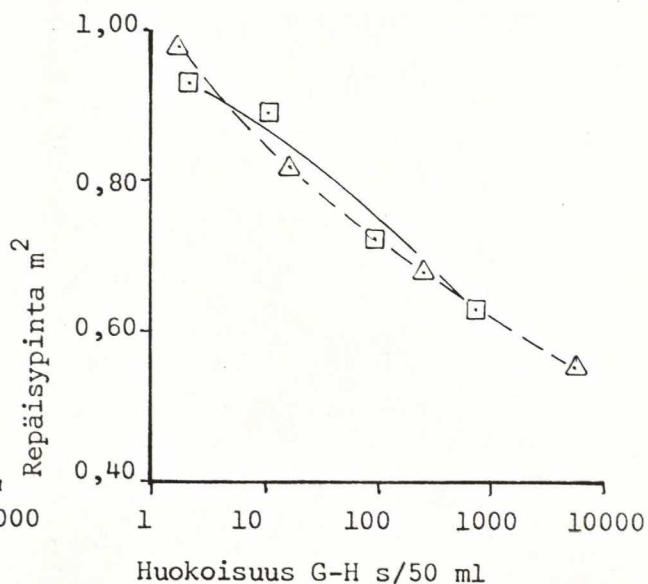
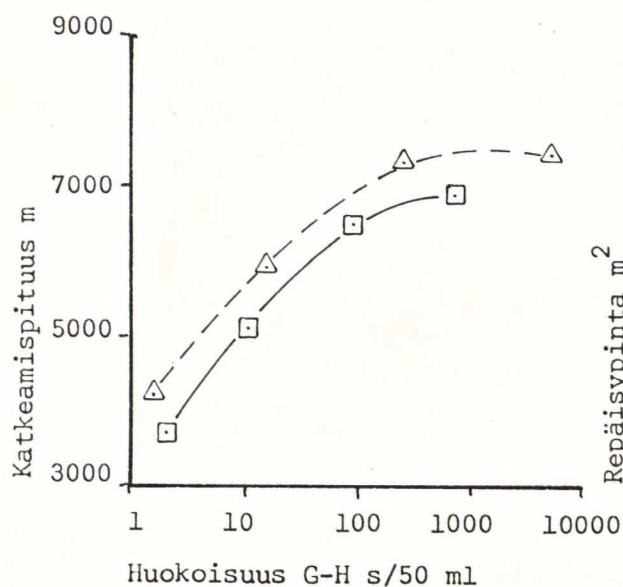
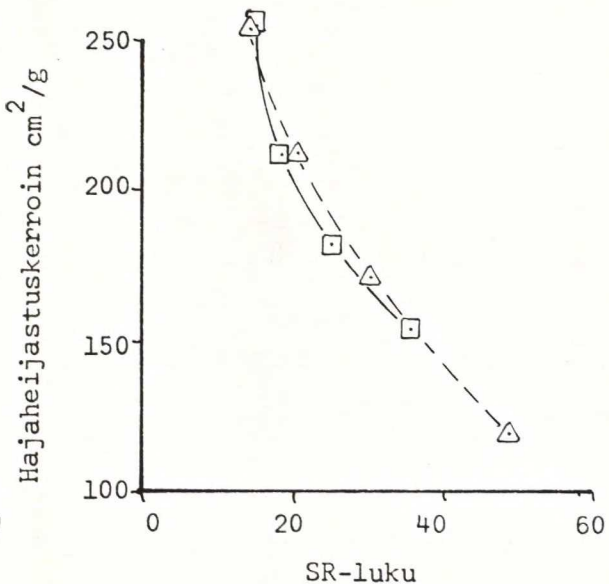
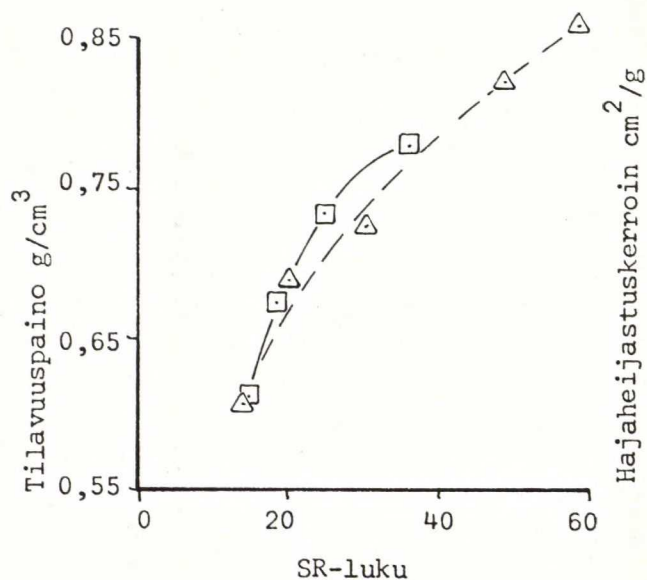
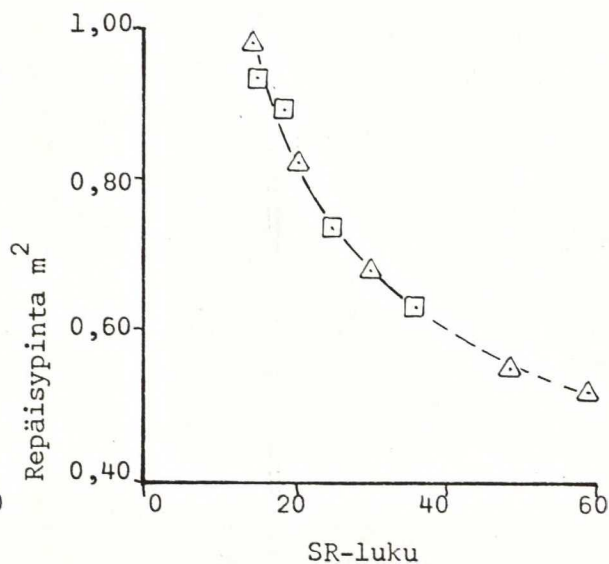
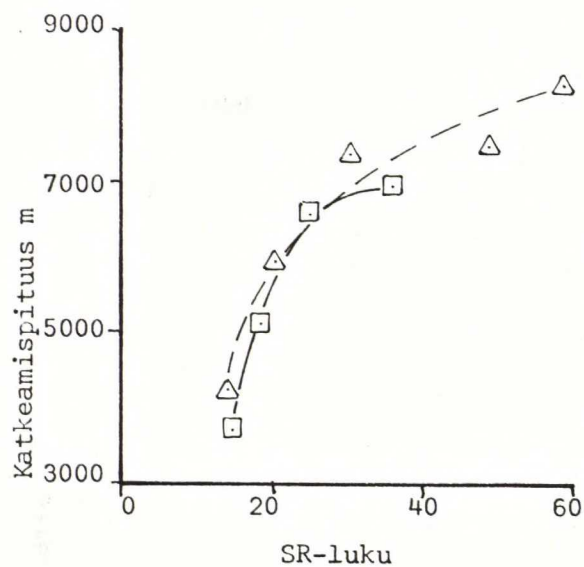
Tilavuusvirtauksen muutos

□ Koepiste 11. 350 l/min 1980 Ws/km 450 r/min 3,2 %

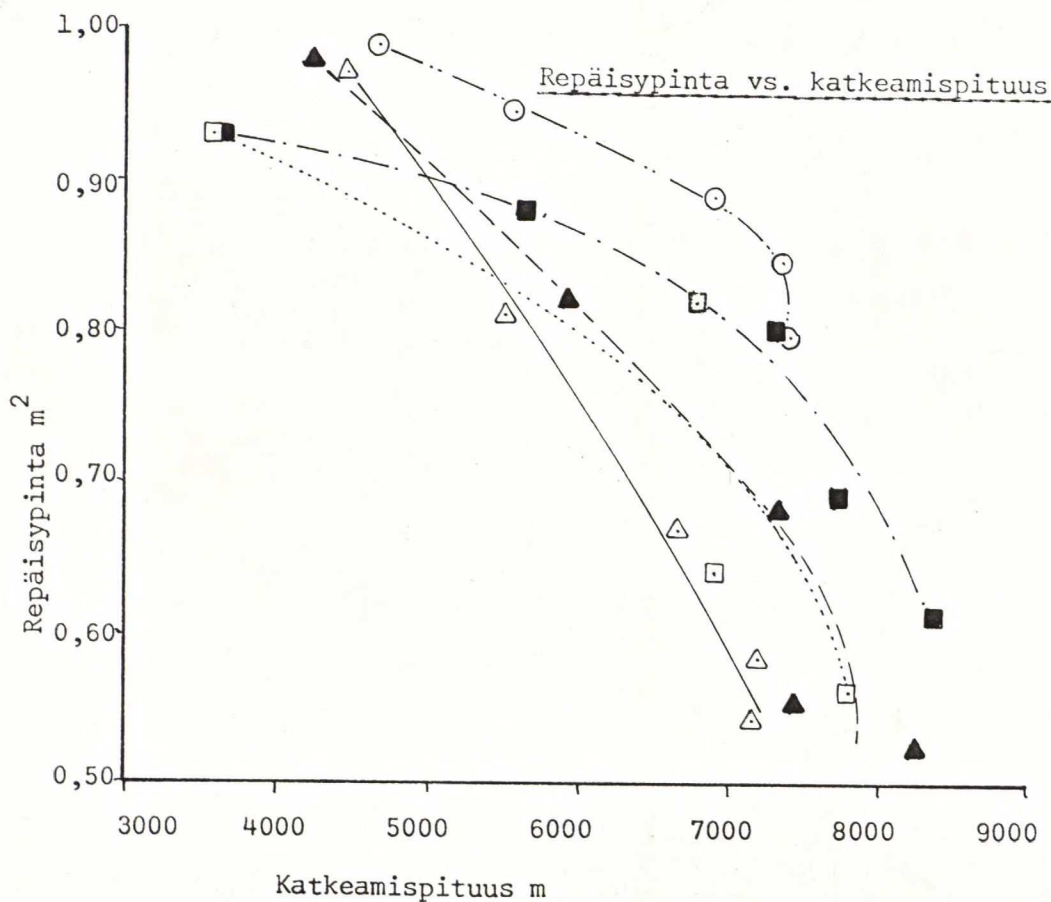
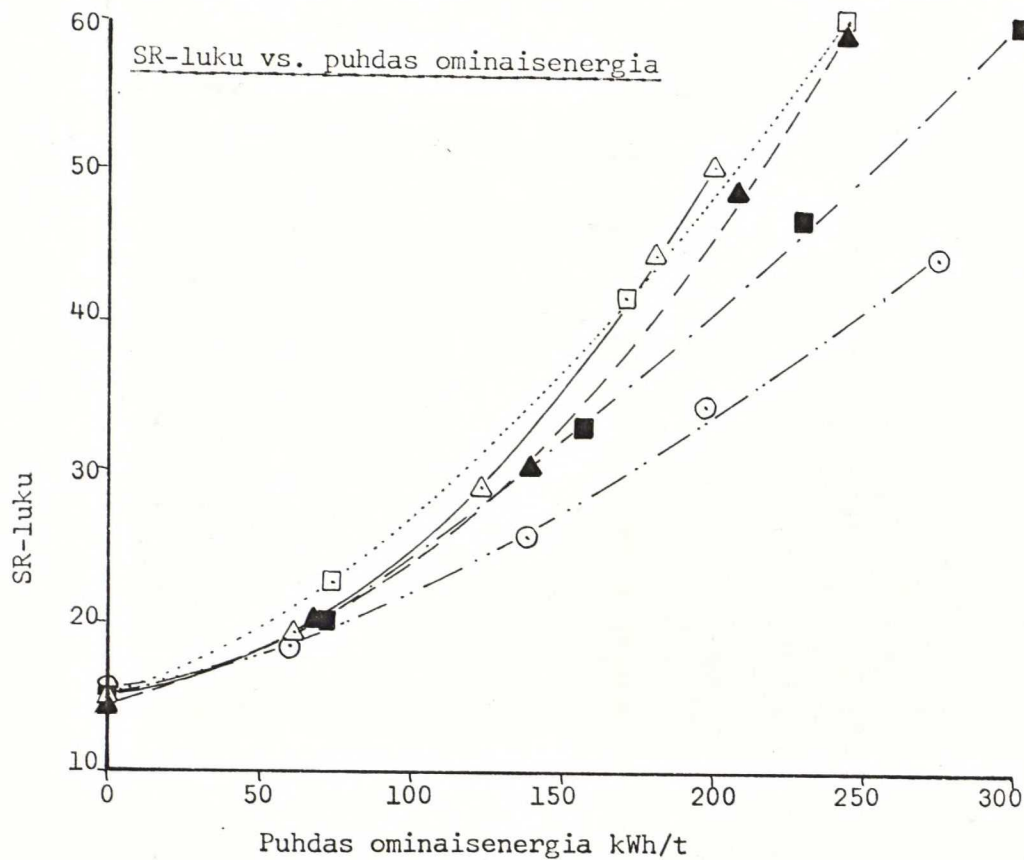
△ Koepiste 4. 500 l/min 2015 Ws/km 450 r/min 3,0 %










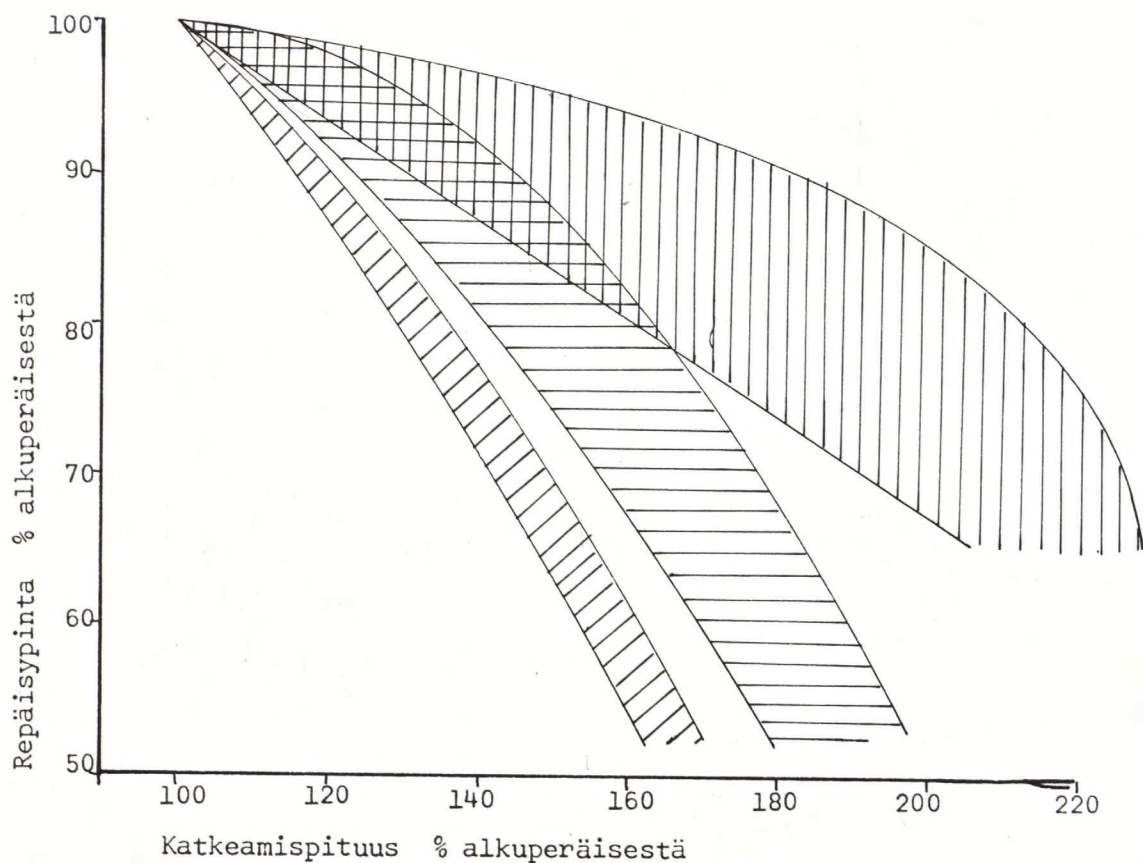
○	Koepiste 1.	1055 Ws/km	1500 r/min	2,9 %	500 l/min
■	Koepiste 2.	1050	850	2,8	500
□	Koepiste 3.	2020	850	2,7	500
▲	Koepiste 4.	2015	450	3,0	500
△	Koepiste 5.	3500	450	3,0	500

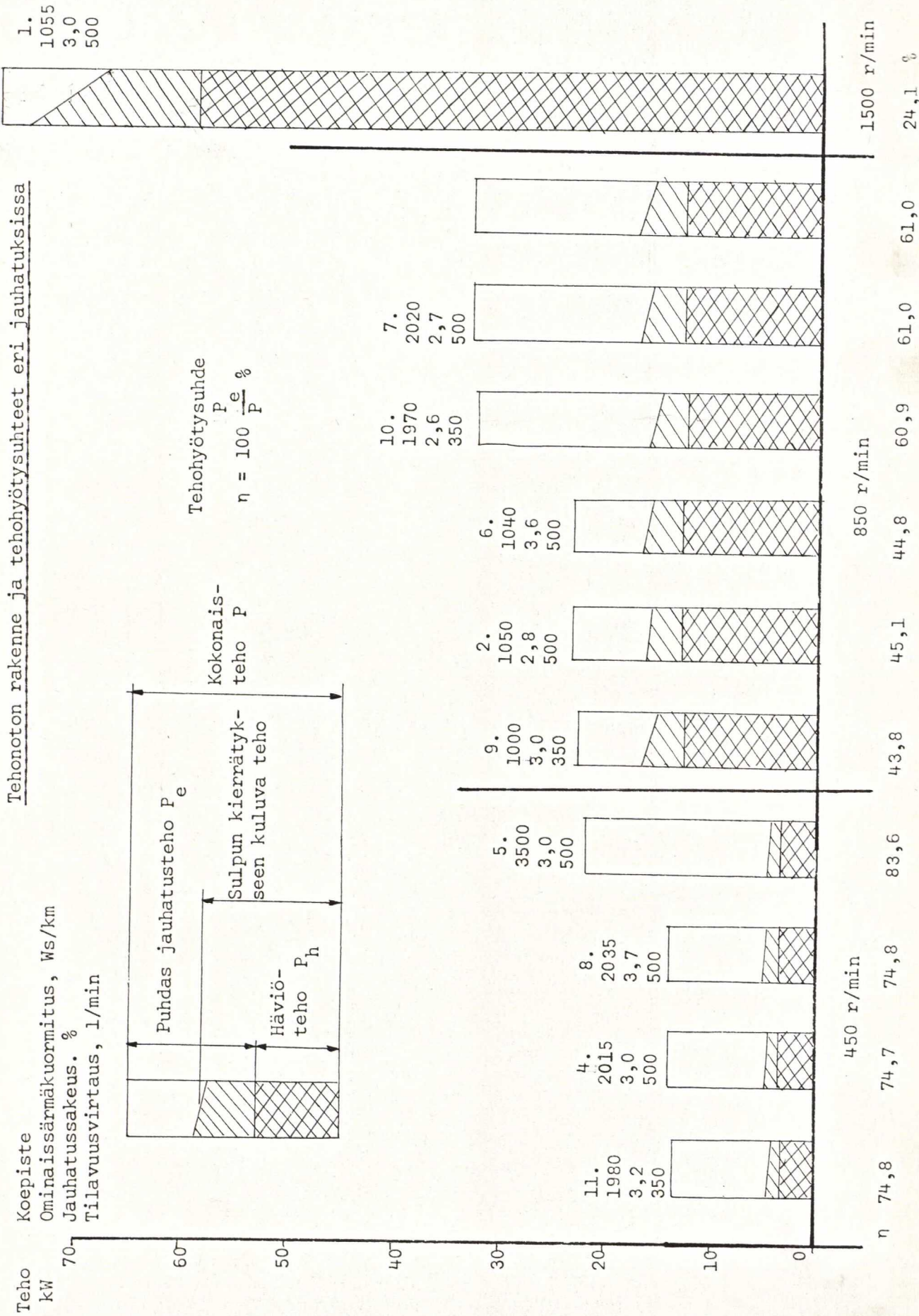


Eri ominaissärmäkuormituksilla saavutetut repäisypinta-
katkeamispituuskombinaatiot

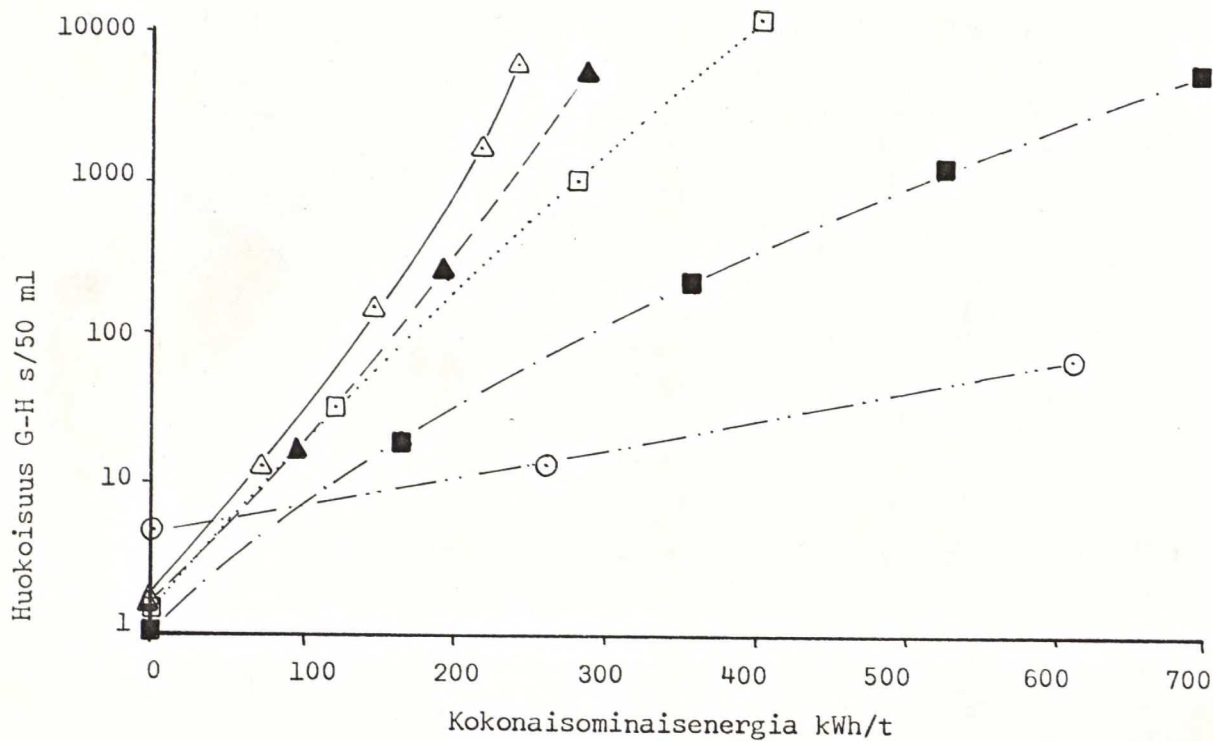
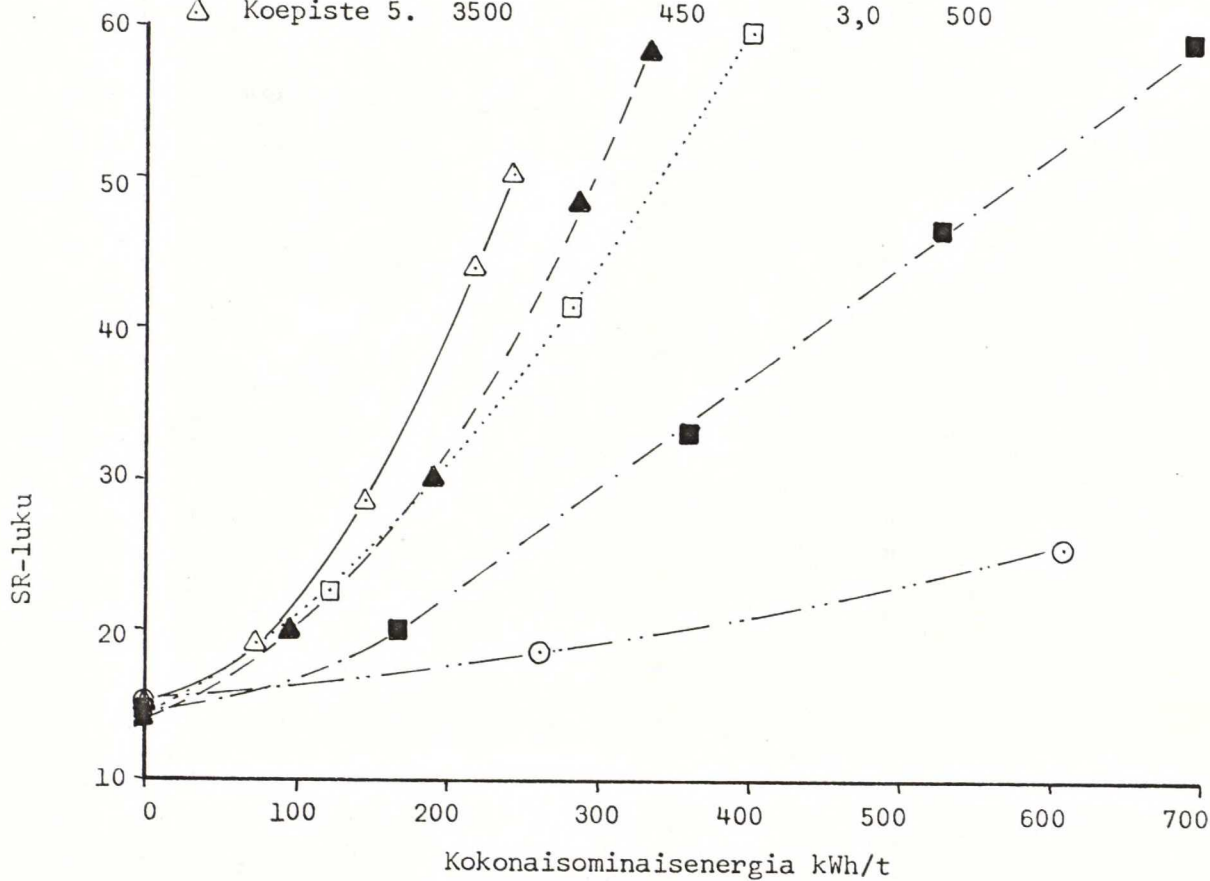
(Alueiden sisälle jää jokaisen jauhatuksen kaikkien
näytepisteiden määritykset)

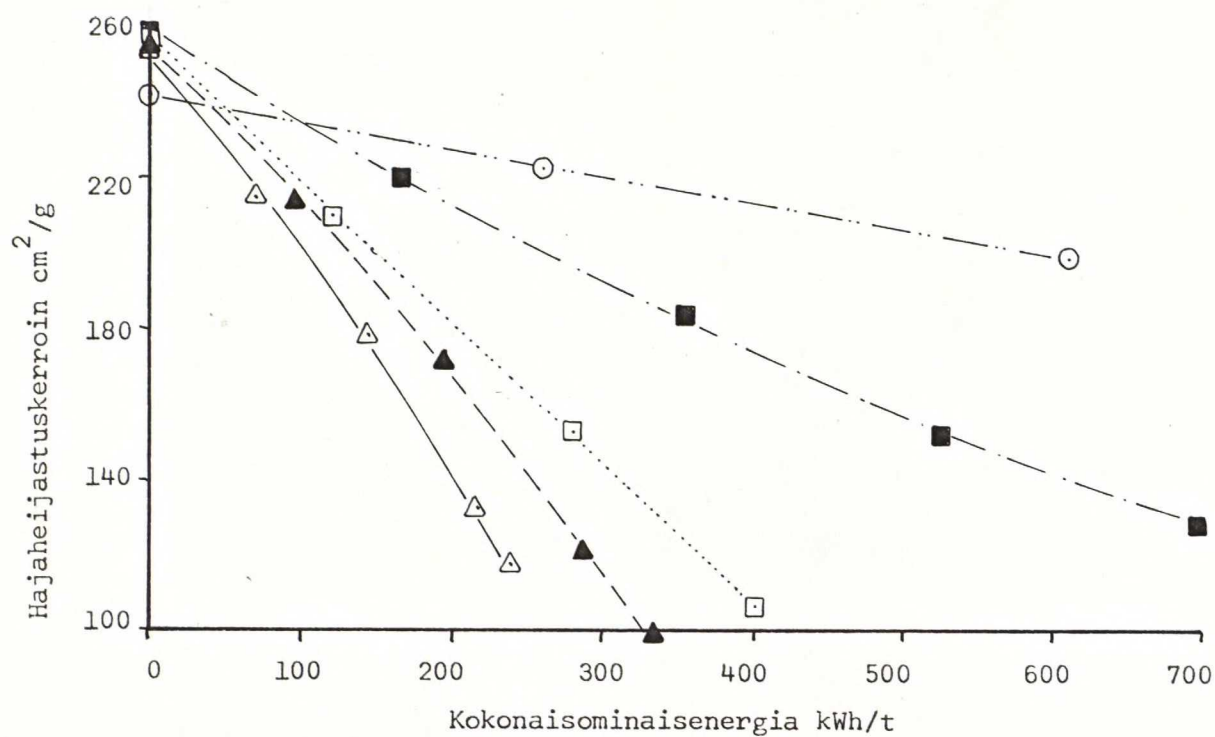
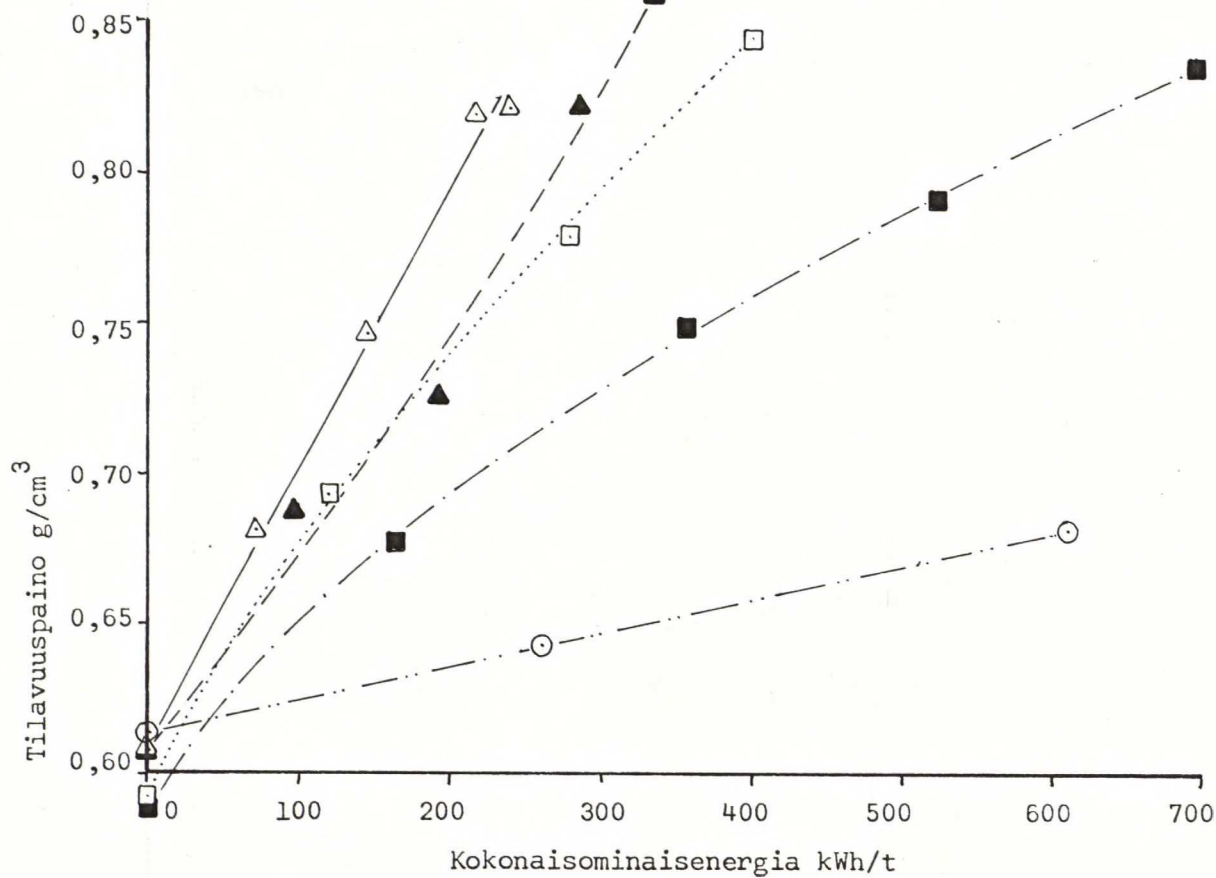
	1020...1055 Ws/km	850...1500 r/min	2,8...3,6 %	350...500 l/min
	1970...2035 Ws/km	450...850 r/min	2,6...3,7 %	350...500 l/min
	3500 Ws/km	450 r/min	3,0 %	500 l/min

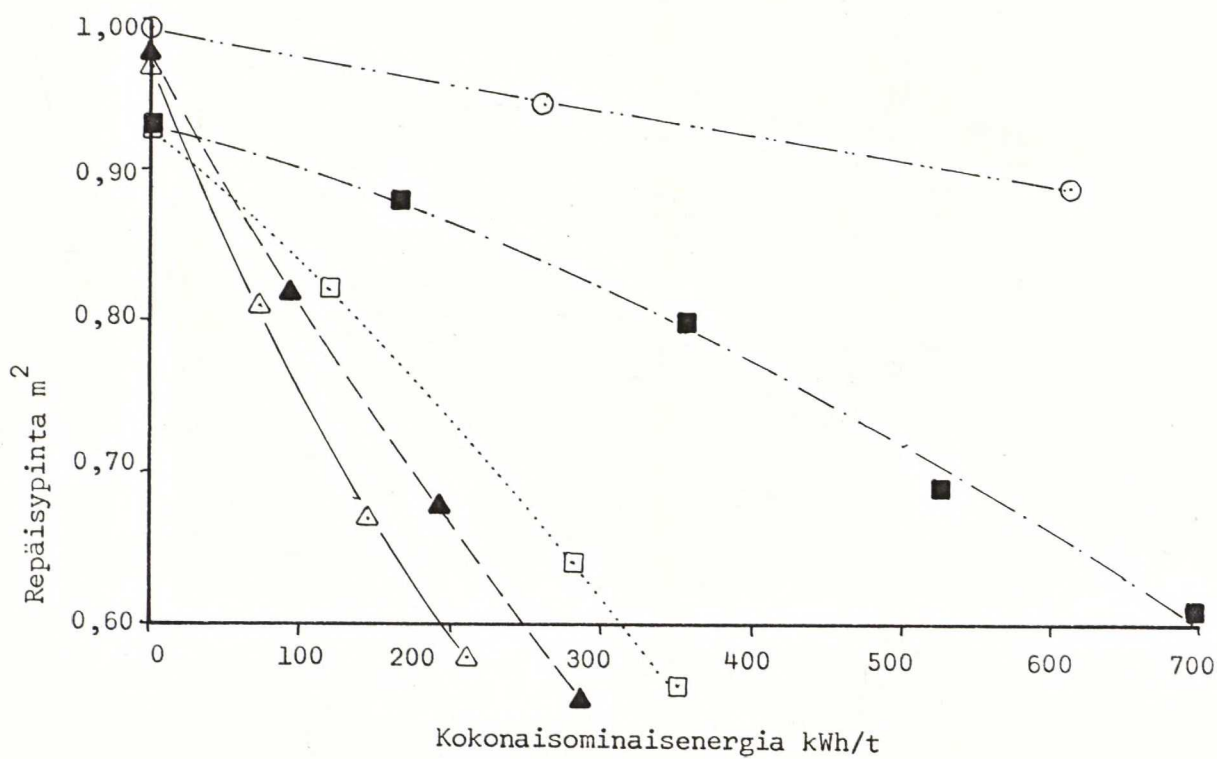
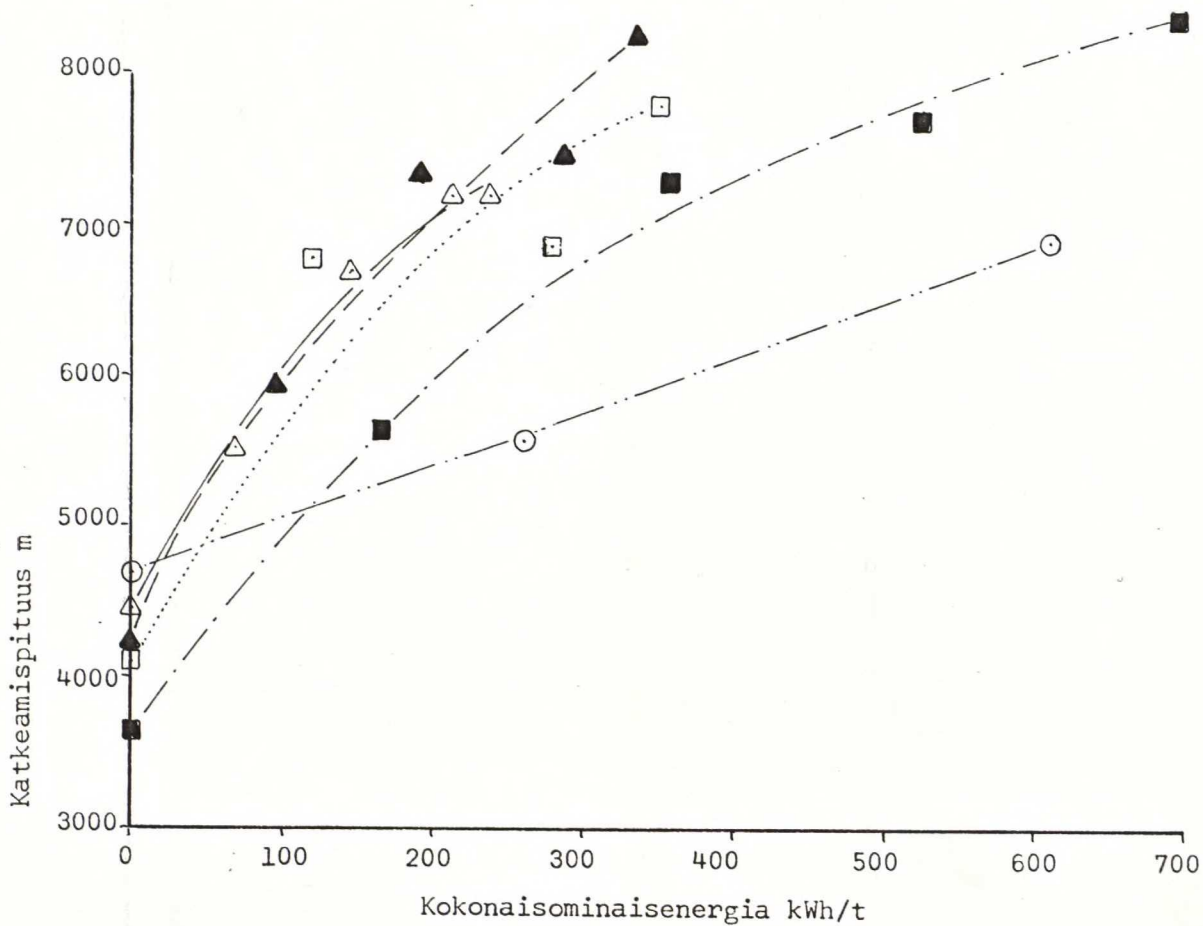




○	Koepiste 1.	1055 Ws/km	1500 r/min	2,9 %	500 l/min
■	Koepiste 2.	1050	850	2,8	500
□	Koepiste 3.	2020	850	2,7	500
▲	Koepiste 4.	2015	450	3,0	500
△	Koepiste 5.	3500	450	3,0	500







HÄVIÖTEHO JA SEN KOOSTUMUSA. Kokonaishäviöteho

Pyörimisnopeus r/min	Tilavuusvirtaus l/min	Häviöteho kW
450	350	3,5
	500	3,6
850	350	12,6
	500	12,8
1500	350	57,3
	500	58,6

Verrannollinen pyörimisnopeuden potenssiin n. 2,95.

B. Mekaaninen häviöteho

Pyörimisnopeus r/min	Tilavuusvirtaus l/min	Mekaaniset häviöt kW	Mekaaniset häviöt % kokonaishäviötehosta
450	350	2,1	60,0
	500	2,1	58,3
850	350	2,5	19,8
	500	2,5	19,5
1500	350	3,6	6,3
	500	3,6	6,1

Riippuvuus pyörimisnopeudesta lineaarinen.

C. Efektiiviseen pumppaukseen kuluva teho

Pyörimisnopeus r/min	Tilavuusvirtaus l/min	Pumppausteho kW	Pumppausteho % kokonaishäviötehosta
450	350	0,07	2,0
	500	0,08	2,2
850	350	0,26	2,1
	500	0,34	2,6
1500	350	0,80	1,4
	500	1,09	1,9

Verrannollinen pyörimisnopeuden neliöön.

D. Turbulensseihin ja paluuvirtaukseen kuluva teho

(Hydraulinen häviöteho)

Pyörimisnopeus r/min	Tilavuusvirtaus l/min	Hydraulinen häviöteho kW	Hydraulinen häviöteho % kokonaishäviötehosta
450	350	1,3	38,0
	500	1,4	39,5
850	350	9,8	78,1
	500	10,0	77,9
1500	350	52,9	92,3
	500	53,9	92,0

Verrannollinen pyörimisnopeuden kuutioon.

TULOSTAULUKOT

Käytetyt merkinnät:

B_s = ominaissärmäkuormitus

n = pyörimisnopeus

s = jauhatussakeus

q = tilavuusvirtaus

P_e = puhdas jauhatusteho

P_h = häviöteho

P = kokonaisakseliteho

p_1 = tulopuolen paine

p_2 = menopuolen paine

TOISTETTAVUUSTUTKIMUSJauhatus 1.

$B_s = 1880 \text{ Ws/km}$	$P_e = 18,7 \text{ kW}$	$p_1 = 0,35 \text{ kp/cm}^2$
$n = 850 \text{ r/min}$	$P_h = 12,6 \text{ kW}$	$p_2 = 0,90 \text{ kp/cm}^2$
$s = 2,9 \%$	$P = 31,3 \text{ kW}$	
$q = 300 \text{ l/min}$		

Läpimenojen määrä	0	2	4	6	8
Puhdas ominaisenergia kWh/t	0	71	143	214	285
Kokonaisominaisenergia kWh/t	0	119	239	358	477
Lämpötila °C	29,9	30,5	31,9	32,5	34,3
SR-luku	15,0	22,5	30,5	39,5	53,5
Suotautumisaika s	4,5	5,6	9,6	15,0	33,5
Potentiaallinen kutistuma %	3,0	5,0	6,8	7,8	9,7
Murtovenymä %	3,1	3,5	3,7	3,6	3,6
Tilavuuspaino g/cm ³	0,59	0,66	0,72	0,75	0,80
Hajaheijastuskerroin cm ² /g	256	216	188	168	133
Katkeamispituus m	4020	6650	7910	8010	8300
Repäisyypinta m ²	0,91	0,83	0,71	0,66	0,56
Huokoisuus s/50 ml	2,8	39,1	420	1531	-

Jauhatus 2.

$B_s = 2020 \text{ Ws/km}$	$P_e = 20,1 \text{ kW}$	$p_1 = 0,33 \text{ kp/cm}^2$
$n = 850 \text{ r/min}$	$P_h = 12,6 \text{ kW}$	$p_2 = 0,87 \text{ kp/cm}^2$
$s = 2,9 \%$	$P = 32,7 \text{ kW}$	
$q = 300 \text{ l/min}$		

Läpimenojen määrä	0	2	4	6	8
Puhdas ominaisenergia kWh/t	0	78	156	234	311
Kokonaisominaisenergia kWh/t	0	126	251	377	503
Lämpötila °C	26,3	27,7	29,5	32,1	33,4
SR-luku	14,0	21,5	31,0	43,0	57,0
Suotautumisaika s	4,6	5,8	9,3	19,4	42,5
Potentiaallinen kutistuma %	3,5	4,3	6,2	9,3	9,8
Murtovenymä %	2,7	3,3	3,3	3,5	3,5
Tilavuuspaino g/cm ³	0,60	0,68	0,73	0,78	0,83
Hajaheijastuskerroin cm ² /g	247	208	181	150	113
Katkeamispituus m	4230	6830	7860	8440	8260
Repäisypinta m ²	0,94	0,79	0,69	0,64	0,56
Huokoisuus s/50 ml	2,1	47,9	358	2428	-

Jauhatus 3.

$B_s = 2040 \text{ Ws/km}$	$P_e = 20,3 \text{ kW}$	$p_1 = 0,35 \text{ kp/cm}^2$
$n = 850 \text{ r/min}$	$P_h = 12,6 \text{ kW}$	$p_2 = 0,85 \text{ kp/cm}^2$
$s = 2,6 \%$	$P = 32,9 \text{ kW}$	
$q = 300 \text{ l/min}$		

Läpimenojen määrä	0	2	4	6	7
Puhdas ominaisenergia kWh/t	0	85	171	256	299
Kokonaisominaisenergia kWh/t	0	138	277	415	484
Lämpötila °C	25,2	27,1	28,5	30,2	30,8
SR-luku	15,0	22,0	33,0	45,5	51,0
Suotautumisaika s	4,6	6,0	9,2	20,8	28,4
Potentiaallinen kutistuma %	3,4	5,0	7,0	9,2	10,7
Murtovenymä %	3,5	3,7	3,5	3,6	3,7
Tilavuuspaino g/cm ³	0,59	0,69	0,74	0,79	0,81
Hajaheijastuskerroin cm ² /g	258	210	176	137	120
Katkeamispituus m	4030	6910	8400	8580	9180
Repäisyypinta m ²	0,94	0,82	0,68	0,57	0,55
Huokoisuus s/50 ml	2,1	41,0	476	4778	-

Jauhatus 4.

$B_s = 2020 \text{ Ws/km}$	$P_e = 20,1 \text{ kW}$	$p_1 = 0,30 \text{ kp/cm}^2$
$n = 850 \text{ r/min}$	$P_h = 12,8 \text{ kW}$	$p_2 = 0,75 \text{ kp/cm}^2$
$s = 2,7 \%$	$P = 32,9 \text{ kW}$	
$q = 500 \text{ l/min}$		

Läpimenojen määrä	0	3	7	10
Puhdas ominaisenergia kWh/t	0	74	172	246
Kokonaisominaisenergia kWh/t	0	120	281	402
Lämpötila °C	26,5	29,2	31,0	31,4
SR-luku	14,5	22,5	41,5	59,5
Suotautumisaika s	4,5	6,2	18,0	57,3
Potentialaalinen kutistuma %	3,9	5,2	8,9	12,0
Murtovenymä %	3,2	3,6	3,6	4,1
Tilavuuspaino g/cm ³	0,59	0,69	0,78	0,84
Hajaheijastuskerroin cm ² /g	258	209	153	106
Katkeamispituus m	4080	6780	6840	7780
Repäisyypinta m ²	0,93	0,82	0,64	0,56
Huokoisuus s/50 ml	1,4	32,8	995	n. 12000

Jauhatus 5.

$B_s = 1980 \text{ Ws/km}$	$P_e = 19,7 \text{ kW}$	$p_1 = 0,34 \text{ kp/cm}^2$
$n = 850 \text{ r/min}$	$P_h = 12,8 \text{ kW}$	$p_2 = 0,76 \text{ kp/cm}^2$
$s = 3,3 \%$	$P = 32,5 \text{ kW}$	
$q = 500 \text{ l/min}$		

Läpimenojen määrä	0	2	5	7	10
Puhdas ominaisenergia kWh/t	0	40	100	140	200
Kokonaisominaisenergia kWh/t	0	66	165	231	330
Lämpötila °C	27,8	28,4	28,9	29,9	31,7
SR-luku	15,0	19,0	27,5	37,0	51,0
Suotautumisaika s	4,6	5,0	6,8	10,7	20,7
Potentiaallinen kutistuma %	3,7	4,7	6,0	7,4	9,5
Murtovenymä %	3,3	3,5	3,9	3,4	3,6
Tilavuuspaino g/cm ³	0,59	0,63	0,69	0,71	0,77
Hajaheijastuskerroin cm ² /g	255	226	197	178	148
Katkeamispituus m	4130	5370	6970	6550	7240
Repäisyypinta m ²	0,95	0,91	0,80	0,74	0,68
Huokoisuus s/50 ml	3,3	13,0	88,3	362	-

VARSINAISET JAUHATUKSETKoepiste 1.

$B_s = 1055 \text{ Ws/km}$	$P_e = 18,6 \text{ kW}$	$p_1 = 0,20 \text{ kp/cm}^2$
$n = 1500 \text{ r/min}$	$P_h = 58,6 \text{ kW}$	$p_2 = 1,55 \text{ kp/cm}^2$
$s = 2,9 \%$	$P = 77,2 \text{ kW}$	
$q = 500 \text{ l/min}$		

Läpimenojen määrä	0	3	7	10	14
Puhdas ominaisenergia kWh/t	0	63	147	210	294
Kokonaisominaisenergia kWh/t	0	261	608	870	1219
Lämpötila °C	29,1	31,8	35,5	40,1	44,0
SR-luku	15,5	18,5	25,5	34,0	44,0
Suotautumisaika s	4,8	5,3	6,8	10,5	20,3
Potentiaallinen kutistuma %	3,6	4,3	5,4	6,0	7,6
Murtovenymä %	3,5	3,5	3,7	3,8	3,8
Tilavuuspaino g/cm ³	0,61	0,64	0,68	0,72	0,76
Hajaheijastuskerroin cm ² /g	242	222	198	184	158
Katkeamispituus m	4680	5570	6890	7330	7380
Repäisyypinta m ²	0,99	0,94	0,89	0,84	0,80
Huokoisuus s/50 ml	4,8	13,5	67,7	237	-

Koepiste 2.

$B_s = 1050 \text{ Ws/km}$	$P_e = 10,5 \text{ kW}$	$p_1 = 0,31 \text{ kp/cm}^2$
$n = 850 \text{ r/min}$	$P_h = 12,8 \text{ kW}$	$p_2 = 0,76 \text{ kp/cm}^2$
$s = 2,8 \%$	$P = 23,3 \text{ kW}$	
$q = 500 \text{ l/min}$		

Läpimenojen määrä	0	6	13	19	25
Puhdas ominaisenergia kWh/t	0	75	163	238	313
Kokonaisominaisenergia kWh/t	0	167	361	528	695
Lämpötila °C	27,2	28,9	30,7	32,6	34,3
SR-luku	15,0	20,0	33,0	46,5	59,0
Suotautumisaika s	4,6	5,6	11,3	25,1	58,9
Potentiaallinen kutistuma %	3,8	4,7	6,7	9,3	10,8
Murtovenymä %	3,1	3,5	3,9	3,9	4,5
Tilavuuspaino g/cm ³	0,59	0,68	0,75	0,79	0,83
Hajaheijastuskerroin cm ² /g	260	220	183	151	128
Katkeamispituus m	3630	5650	7290	7710	8350
Repäisyypinta m ²	0,93	0,88	0,80	0,69	0,61
Huokoisuus s/50 ml	1,1	18,4	212	1245	5233

Koepiste 3.

$B_s = 2020 \text{ Ws/km}$	$P_e = 20,1 \text{ kW}$	$p_1 = 0,30 \text{ kp/cm}^2$
$n = 850 \text{ r/min}$	$P_h = 12,8 \text{ kW}$	$p_2 = 0,75 \text{ kp/cm}^2$
$s = 2,7 \%$	$P = 32,9 \text{ kW}$	
$q = 500 \text{ l/min}$		

Läpimenojen määrä	0	3	7	10
Puhdas ominaisenergia kWh/t	0	74	172	246
Kokonaisominaisenergia kWh/t	0	120	281	402
Lämpötila °C	26,5	29,2	31,0	31,4
SR-luku	14,5	22,5	41,5	59,5
Suotautumisaika s	4,5	6,2	18,0	57,3
Potentiaallinen kutistuma %	3,9	5,2	8,9	12,0
Murtovenymä %	3,2	3,6	3,6	4,1
Tilavuuspaino g/cm ³	0,59	0,69	0,78	0,84
Hajaheijastuskerroin cm ² /g	258	209	153	106
Katkeamispituus m	4080	6780	6840	7780
Repäisyypinta m ²	0,93	0,82	0,64	0,56
Huokoisuus s/50 ml	1,4	32,8	995	n. 12000

Koepiste 4.

$B_s = 2015 \text{ Ws/km}$	$P_e = 10,6 \text{ kW}$	$p_1 = 0,30 \text{ kp/cm}^2$
$n = 450 \text{ r/min}$	$P_h = 3,6 \text{ kW}$	$p_2 = 0,39 \text{ kp/cm}^2$
$s = 3,0 \%$	$P = 14,2 \text{ kW}$	
$q = 500 \text{ l/min}$		

Läpimenojen määrä	0	6	12	18	21
Puhdas ominaisenergia kWh/t	0	71	142	213	249
Kokonaisominaisenergia kWh/t	0	95	191	286	333
Lämpötila °C	26,7	27,8	28,9	29,2	30,2
SR-luku	14,0	20,0	30,0	48,5	58,5
Suotautumisaika s	4,8	5,6	9,1	23,1	42,3
Potentiaallinen kutistuma %	3,5	6,2	8,6	11,4	12,7
Murtovenymä %	3,1	3,5	4,2	3,8	4,3
Tilavuuspaino g/cm ³	0,61	0,69	0,73	0,82	0,86
Hajaheijastuskerroin cm ² /g	254	213	171	121	99
Katkeamispituus m	4250	5920	7330	7440	8260
Repäisyypinta m ²	0,98	0,82	0,68	0,55	0,52
Huokoisuus s/50 ml	1,6	15,9	243	5325	-

Koepiste 5.

$B_s = 3500 \text{ Ws/km}$	$P_e = 18,4 \text{ kW}$	$p_1 = 0,32 \text{ kp/cm}^2$
$n = 450 \text{ r/min}$	$P_h = 3,6 \text{ kW}$	$p_2 = 0,40 \text{ kp/cm}^2$
$s = 3,0 \%$	$P = 22,0 \text{ kW}$	
$q = 500 \text{ l/min}$		

Läpimenojen määrä	0	3	6	9	10
Puhdas ominaisenergia kWh/t	0	61	121	182	202
Kokonaisominaisenergia kWh/t	0	73	145	218	242
Lämpötila °C	28,3	28,7	29,4	29,8	31,1
SR-luku	15,0	19,0	28,5	44,0	50,0
Suotautumisaika s	4,8	5,3	7,6	18,1	23,4
Potentiaallinen kutistuma %	3,6	5,3	7,9	10,2	11,8
Murtovenymä %	3,2	3,5	3,9	4,2	4,1
Tilavuuspaino g/cm ³	0,61	0,68	0,75	0,82	0,82
Hajaheijastuskerroin cm ² /g	254	215	178	133	117
Katkeamispituus m	4480	5520	6680	7200	7180
Repäisyypinta m ²	0,97	0,81	0,67	0,58	0,54
Huokoisuus s/50 ml	1,6	13,2	148	1707	6002

Koepiste 6.

$B_s = 1040 \text{ Ws/km}$	$P_e = 10,4 \text{ kW}$	$P_1 = 0,33 \text{ kp/cm}^2$
$n = 850 \text{ r/min}$	$P_h = 12,8 \text{ kW}$	$P_2 = 0,70 \text{ kp/cm}^2$
$s = 3,6 \%$	$P = 23,2 \text{ kW}$	
$q = 500 \text{ l/min}$		

Läpimenojen määrä	0	7	14	21	26
Puhdas ominaisenergia kWh/t	0	67	133	200	247
Kokonaisominaisenergia kWh/t	0	149	297	446	553
Lämpötila °C	30,5	32,0	33,7	34,8	37,5
SR-luku	15,0	21,5	31,5	42,5	51,0
Suotautumisaika s	4,9	5,6	8,6	14,2	26,2
Potentiaallinen kutistuma %	4,4	5,0	6,1	7,4	9,3
Murtovenymä %	3,4	3,6	3,9	4,0	4,3
Tilavuuspaino g/cm ³	0,60	0,66	0,69	0,73	0,76
Hajaheijastuskerroin cm ² /g	246	213	193	172	161
Katkeamispituus m	4190	6160	6830	7280	8650
Repäisyypinta m ²	0,97	0,90	0,84	0,74	0,68
Huokoisuus s/50 ml	3,8	22,5	122	651	-

Koepiste 7.

$B_s = 2010 \text{ Ws/km}$	$P_e = 20,0 \text{ kW}$	$p_1 = 0,30 \text{ kp/cm}^2$
$n = 850 \text{ r/min}$	$P_h = 12,8 \text{ kW}$	$p_2 = 0,70 \text{ kp/cm}^2$
$s = 3,7 \%$	$P = 32,8 \text{ kW}$	
$q = 500 \text{ l/min}$		

Läpimenojen määrä	0	3	6	9	11
Puhdas ominaisenergia kWh/t	0	55	109	164	201
Kokonaisominaisenergia kWh/t	0	90	179	269	319
Lämpötila °C	29,7	32,0	33,4	34,1	36,4
SR-luku	15,5	22,5	32,0	44,5	53,5
Suotautumisaika s	4,7	6,4	9,7	20,7	29,9
Potentiaallinen kutistuma %	4,1	5,7	7,2	8,5	10,0
Murtovenymä %	3,7	3,8	3,9	3,9	4,2
Tilavuuspaino g/cm ³	0,60	0,68	0,72	0,78	0,81
Hajaheijastuskerroin cm ² /g	242	210	175	151	130
Katkeamispituus m	4010	5800	6630	7030	7320
Repäisypinta m ²	1,05	0,96	0,78	0,74	0,65
Huokoisuus s/50 ml	4,9	39,6	232	1761	-

Koepiste 8.

$B_s = 2035 \text{ Ws/km}$	$P_e = 10,7 \text{ kW}$	$p_1 = 0,33 \text{ kp/cm}^2$
$n = 450 \text{ r/min}$	$P_h = 3,6 \text{ kW}$	$p_2 = 0,36 \text{ kp/cm}^2$
$s = 3,7 \%$	$P = 14,3 \text{ kW}$	
$q = 500 \text{ l/min}$		

Läpimenojen määrä	0	8	16	22
Puhdas ominaisenergia kWh/t	0	77	155	213
Kokonaisominaisenergia kWh/t	0	118	237	326
Lämpötila °C	32,0	32,0	33,0	34,4
SR-luku	15,5	21,0	31,0	40,0
Suotautumisaika s	4,6	5,6	7,7	13,6
Potentiaallinen kutistuma %	4,0	6,4	8,4	11,0
Murtovenymä %	3,5	4,0	4,2	4,6
Tilavuuspaino g/cm ³	0,62	0,69	0,75	0,81
Hajaheijastuskerroin cm ² /g	247	210	177	141
Katkeamispituus m	4220	5460	6410	6870
Repäisypinta m ²	0,99	0,89	0,75	0,64
Huokoisuus s/50 ml	3,0	23,5	215	-

Koepiste 9.

$B_s = 1020 \text{ Ws/km}$	$P_e = 10,2 \text{ kW}$	$P_1 = 0,25 \text{ kp/cm}^2$
$n = 850 \text{ r/min}$	$P_h = 12,6 \text{ kW}$	$P_2 = 0,75 \text{ kp/cm}^2$
$s = 3,0 \%$	$P = 22,8 \text{ kW}$	
$q = 350 \text{ l/min}$		

Läpimenojen määrä	0	3	6	9	12
Puhdas ominaisenergia kWh/t	0	49	98	147	196
Kokonaisominaisenergia kWh/t	0	109	219	328	438
Lämpötila °C	26,9	27,7	28,6	29,8	30,4
SR-luku	15,0	18,0	25,5	32,0	40,5
Suotautumisaika s	4,8	5,6	6,9	9,6	14,0
Potentiaallinen kutistuma %	3,8	4,1	4,3	5,9	6,6
Murtovenymä %	3,4	3,3	3,4	3,6	3,7
Tilavuuspaino g/cm ³	0,59	0,67	0,69	0,72	0,74
Hajaheijastuskerroin cm ² /g	259	226	206	196	178
Katkeamispituus m	4240	5320	6500	6770	7070
Repäisypinta m ²	0,95	0,89	0,87	0,82	0,76
Huokoisuus s/50 ml	3,6	16,5	42,8	129	623

Koepiste 10.

$B_s = 1970 \text{ Ws/km}$	$P_e = 19,6 \text{ kW}$	$P_1 = 0,30 \text{ kp/cm}^2$
$n = 850 \text{ r/min}$	$P_h = 12,6 \text{ kW}$	$P_2 = 0,81 \text{ kp/cm}^2$
$s = 2,6 \%$	$P = 32,2 \text{ kW}$	
$q = 350 \text{ l/min}$		

Läpimenojen määrä	0	2	4	6
Puhdas ominaisenergia kWh/t	0	83	165	247
Kokonaisominaisenergia kWh/t	0	136	271	406
Lämpötila °C	26,2	28,1	29,4	31,3
SR-luku	15,5	24,0	40,0	58,0
Suotautumisaika s	4,6	6,8	15,6	54,8
Potentiaallinen kutistuma %	2,6	3,6	6,8	-
Murtovenymä %	3,1	3,8	3,9	4,0
Tilavuuspaino g/cm ³	0,60	0,72	0,77	0,86
Hajaheijastuskerroin cm ² /g	255	203	154	104
Katkeamispituus m	4320	6260	7320	8160
Repäisypinta m ²	0,97	0,75	0,62	0,56
Huokoisuus s/50 ml	1,3	50,6	924	n. 14000

Koepiste 11.

$B_s = 1980 \text{ Ws/km}$	$P_e = 10,4 \text{ kW}$	$p_1 = 0,25 \text{ kp/cm}^2$
$n = 450 \text{ r/min}$	$P_h = 3,5 \text{ kW}$	$p_2 = 0,34 \text{ kp/cm}^2$
$s = 3,2 \%$	$P = 13,9 \text{ kW}$	
$q = 350 \text{ l/min}$		

Läpimenojen määrä	0	4	9	13
Puhdas ominaisenergia kWh/t	0	62	140	203
Kokonaisominaisenergia kWh/t	0	84	188	271
Lämpötila °C	28,8	29,4	30,0	31,4
SR-luku	15,0	18,5	25,0	36,0
Suotautumisaika s	4,7	4,9	6,7	10,0
Potentiaallinen kutistuma %	4,1	5,4	7,3	9,2
Murtovenymä %	3,2	3,7	4,0	4,0
Tilavuuspaino g/cm ³	0,61	0,68	0,74	0,78
Hajaheijastuskerroin cm ² /g	256	213	184	155
Katkeamispituus m	3750	5180	6570	6930
Repäisypinta m ²	0,94	0,89	0,73	0,64
Huokoisuus s/50 ml	2,2	11,9	98,3	814

Taloudellisuuden arvostelutaulukko

Koepiste	Jauhinyksikön kapasiteetti t/vrk			Kokonaisominaisenergia kWh/t			Energiankulutus kWh/vrk
	kun katkeamispituuden muutos (m) on			kun katkeamispituuden muutos (m) on			
	+1000	+2000	+3000	+15	+25	+1000 +2000 +3000	
1.	7,2	3,6	0	2,6	1,8	260 520 ∞	710 1020 1850
2.	7,2	3,4	2,0	1,8	1,3	80 160 280	310 440 560
3.	13,7	6,0	3,2	4,2	2,9	60 130 250	190 270 790
4.	7,3	3,0	1,7	1,8	1,5	50 110 200	180 230 340
5.	10,5	4,2	~2,0	3,3	2,6	50 130 ~260	160 210 530
6.	6,2	2,8	1,7	2,2	1,4	90 210 330	260 400 570
7.	17,2	7,7	3,2	4,7	3,2	45 100 250	170 240 790
8.	4,7	1,8	~1,0	1,7	1,2	70 190 ~350	210 290 340
9.	6,8	2,8	1,2	1,8	1,3	80 200 450	300 420 550
10.	11,8	5,1	2,9	4,1	2,9	70 150 260	190 270 770
11.	6,2	2,8	1,6	1,5	~1,1	50 120 200	230 ~300 330

Tehon mittaaminen Monax 2 mitta-arvonmuuttajalla

Tehon mittaaminen tapahtuu normaalilla kaksivattimittarimenetelmällä. Mittauksen periaate on esitetty oheisessa kuvassa (Liite 79). Mittalaitteet M_1 synnyttävät tehoon $UI\cos\phi$ verrannollisen vääntömomentin M_{d1} . Systemin akseli pyörii tämän vääntömomentin vaikutuksesta liikuttaen kondensaattorin C ylälevyä alalevyn suhteen. Kondensaattorin kapasitanssi muuttuu. Suuritaajuinen (n. 5 kHz) vaihtojännite, joka synnytetään oskillaattorissa O, ohjaa vahvistinta A. Ohjausvirta I_s on riippuvainen kapasitanssista C kasvaen C:n kasvaessa. Vahvistimen A tasasuunnattu ulostulovirta I_a kulkee kompensatiomittalaitteen M_2 ja ulkoisen vastuksen R_a läpi. Se synnyttää ensimmäistä vääntömomenttia M_{d1} vastustavan vääntömomentin M_{d2} . Niin kauan kuin systeemin akseli pyörii mittalaitteen M_1 vaikutuksesta, kasvaa kapasitanssi C ja kompensatiomittalaitteen virta. Vastavääntömomentti kasvaa ja tasapaino saavutetaan, kun molemmat vääntömomentit ovat yhtäsuuret. Tässä tasapainoasemassa

$$M_{d1} = M_{d2} \quad (1)$$

$$\text{Vääntömomentti} \quad M_{d1} = K_1 \times UI\cos\phi$$

$$\text{Vastavääntömom.} \quad M_{d2} = K_2 \times I_a$$

joissa K_1 ja K_2 ovat mittalaittevakioita. Sijoittamalla jälkimmäiset yhtälöt yhtälöön (1) saadaan

$$K_1 \times UI\cos\phi = K_2 \times I_a$$

$$\text{josta} \quad I_a = \frac{K_1}{K_2} UI\cos\phi$$

Kompensaatiovirta on näin suoraan verrannollinen pätötehoon $UI\cos\phi$.

Mittarin kyltissä annettu vastaavaisuus on

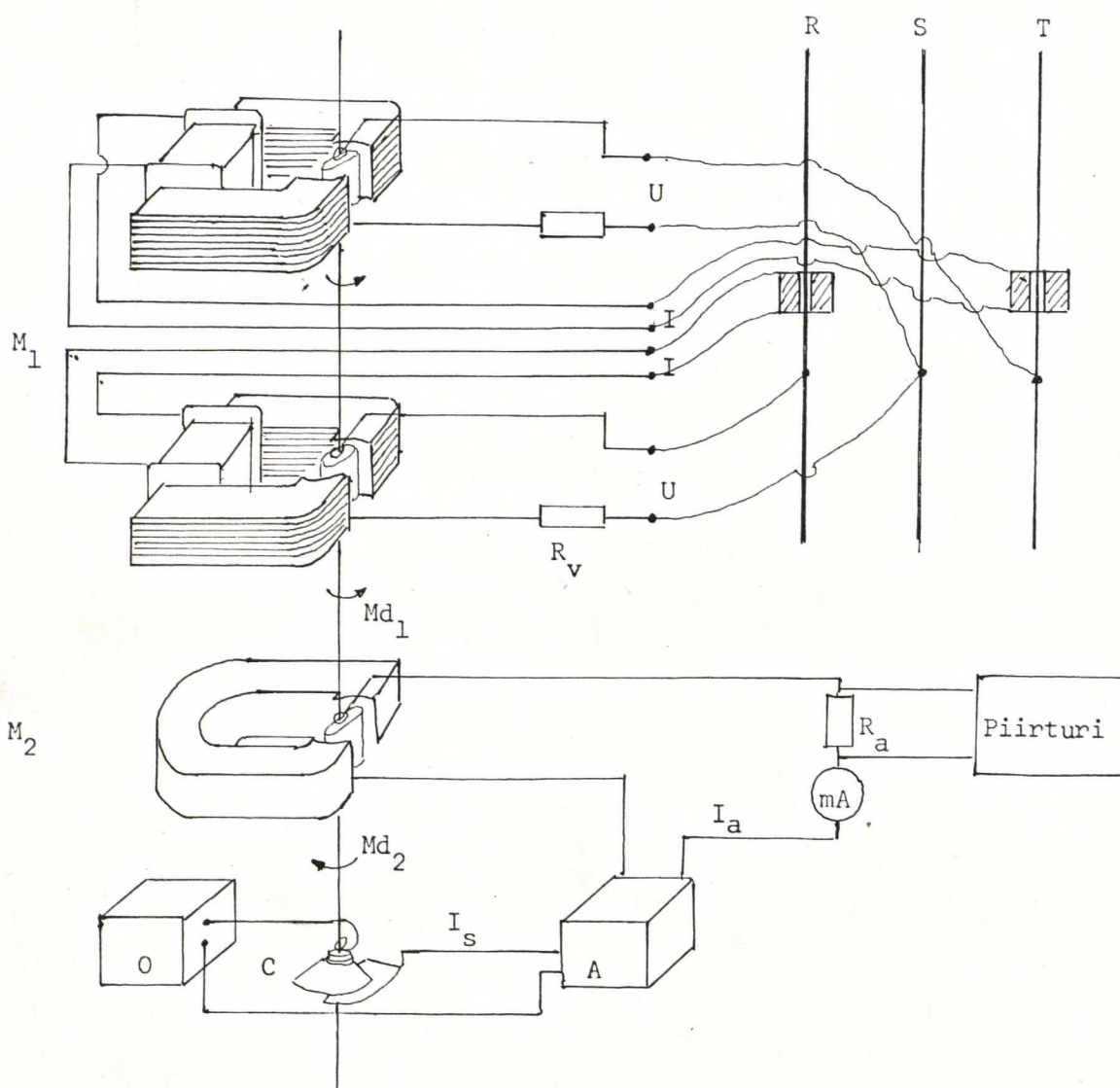
$$1 \text{ mA} \approx 0,6 \text{ kW}$$

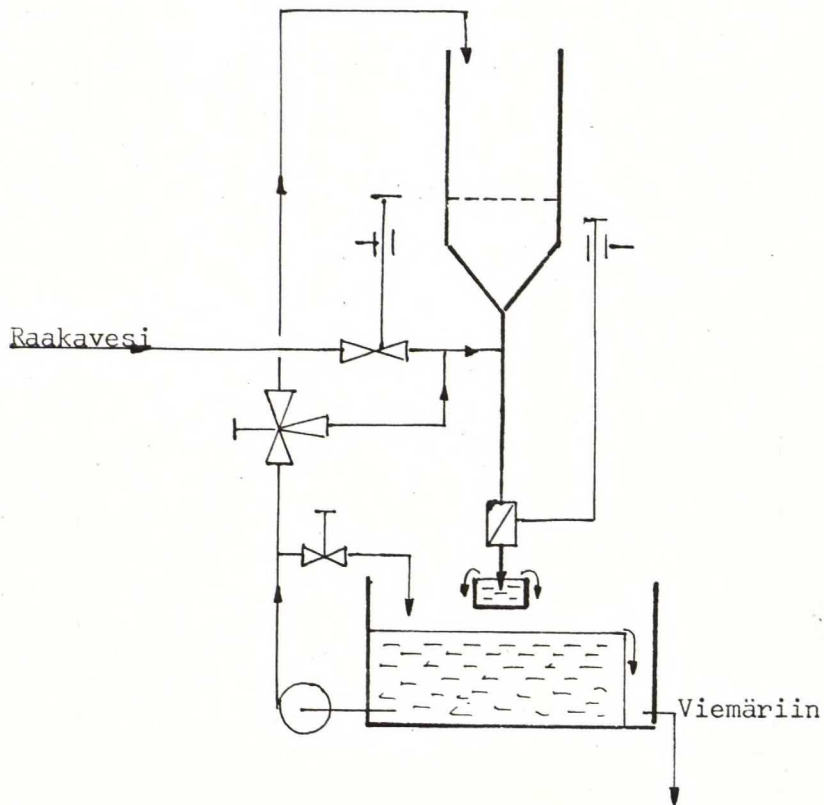
Koko mitta-alue on 0...5 mA.

Kun otetaan vielä huomioon käytettyjen virtamuuntajien muuntosuhde 1:50, saadaan ampeerimittarin lukemista pätötehon arvo käyttäen vastaavaisuutta:

$$1 \text{ mA} \approx 30 \text{ kW}$$

Piirturi on kytketty ulkoisen vastuksen yli. Vastuksessa syntyvä jännitehäviö on suoraan verrannollinen vahvistimen ulostulovirtaan I_a , joten käyttäen em. vastaavaisuutta saadaan piirturi kalibroiduksi osoittamaan suoraan pätötehon arvoja.



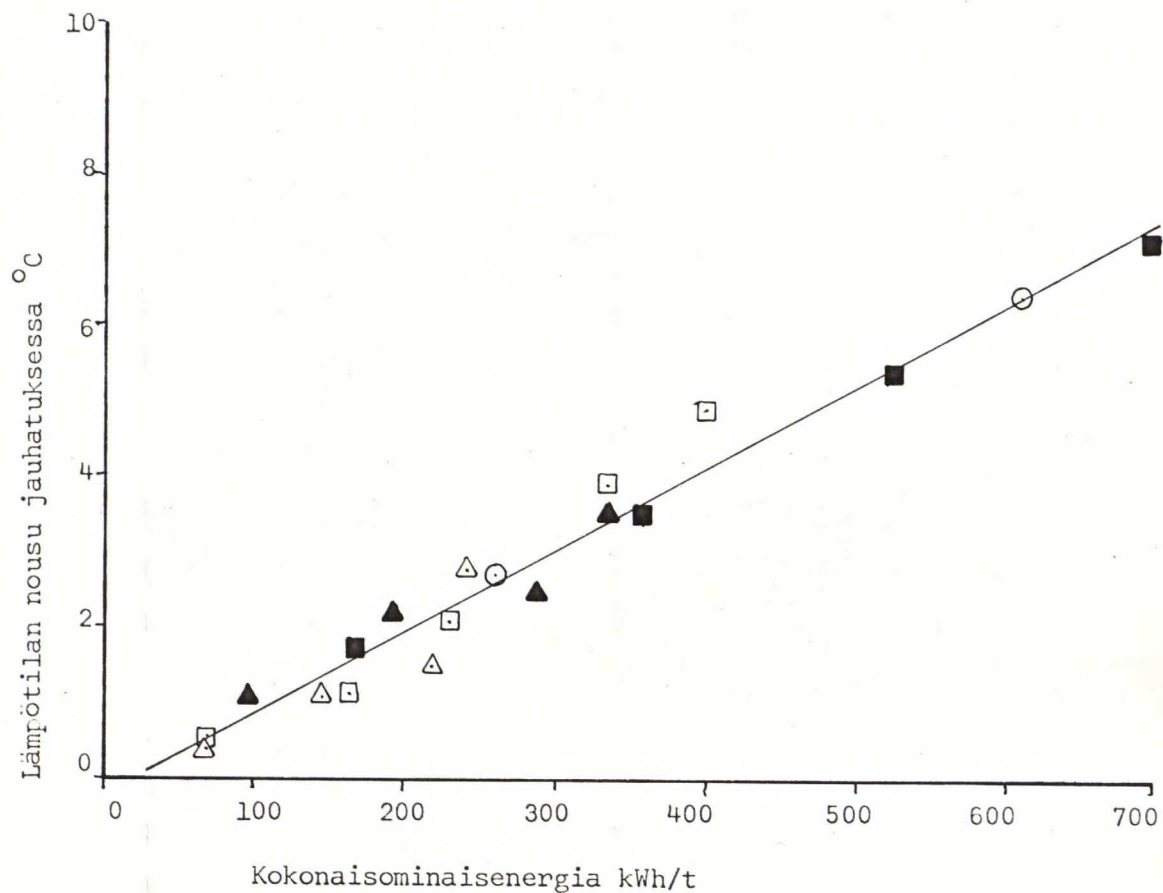
Kiertovesiarkkimuotti

Kiertovesialtaan tilavuus 22,7 l

Systeemin stabiloimiseksi tehtyjen "tasapainoarkkien" lukumäärä 14
kussakin jauhatuspisteessä (lukumäärän valinnan kriteerinä pinta-
painon stabiloituminen)

Potentiaalisen kutistuman määrittäminen

Märkäpuristettuun arkkiin vedettiin yhdensuuntaiset viivat 100 mm:n etäisyydelle toisistaan. Arkki ripustettiin kuivumaan kuivauskaappiin (n. 100°C). 12 tunnin kuluttua mitattiin viivojen etäisyys ja laskettiin arkin prosentuaalinen kutistuma. Arkin rypistyminen kuivauksessa aiheuttaa vaikeuksia määrittämisessä. Rypyt siloiteltiin varovasti viivottimen avulla ennen viivojen välin mittausta.

Lämpötilan nousu kokonaisominaisenergian funktiona

○	Koepiste 1.	1055 Ws/km	1500 r/min	2,9 %	500 l/min
■	Koepiste 2.	1050	850	2,8	500
□	Koepiste 3.	2020	850	2,7	500
▲	Koepiste 4.	2015	450	3,0	500
△	Koepiste 5.	3500	450	3,0	500

Satunnaiset virhelähteet

1. Massan mahdollisesti epätasainen laatu
2. Sulputuksen aiheuttamat virheet
 - 2.1. Jauhatuslämpötilan vaihtelu (maksimi n. ± 7 %)
3. Kuidutuksen aiheuttamat virheet
 - 3.1. Erot "jauhamattoman" sulpun jauhautuneisuudessa (pyörimisnopeus, sakeus ja tilavuusvirtaus vaikuttavat eroihin)
4. Jauhatusmuuttujien säädön epätarkkuudet
 - 4.1. Tehonsäädön epätarkkuus (havaittu maksimivaihtelu n. ± 2 %; mittauksen tarkkuus hyvä; terävälín asettelutarkkuus ei kovin hyvä)
 - 4.2. Jauhatussakeuden vaihtelu (havaittu maksimivaihtelu suuri, n. ± 7 %; määritysten hajonta vaikuttaa; näytteenoton edustavuus ja poksiveden osuus huomioitava)
 - 4.3. Tilavuusvirtauksen vaihtelu (ei jatkuvaa mittausta, joten virheestä ei ole tarkkaa tietoa; stroboskoopin tarkkuus n. ± 2 %)
 - 4.4. Kuristuksen epätarkkuudesta johtuvat erot tulopuolen paineessa (maksimivaihtelu n. ± 15 %)
5. Kyypien vaihdon epämääräisyyden mahdollisesti aiheuttamat virheet (prosessityyppi muuttuu; tuodaanko kierrätettävään sulppuun sama keskimääräinen energia kuin muuhun sulppuun?)
6. Näytteenoton edustavuus (sekoittimien toiminta vaikuttaa; kertymänäyteperiaate parantaa)
7. Arkinteosta johtuvat virheet
8. Määritysten hajonta